

---

# Farbdifferenz-Skalierung zur Farbqualitätsbeurteilung von Halbleiter-Lichtquellen

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**Dissertation**

von

**Dipl.-Ing. Stefan Brückner**

geboren am 18.04.1979

in Sömmerda

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Tag der Einreichung: 17.04.2014

Tag der mündlichen Prüfung: 10.10.2014

D17

Darmstadt 2014

---

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als  
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-43047  
URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4304/>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,  
E-Publishing-Service der TU Darmstadt.  
<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>  
[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

Die Veröffentlichung steht unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell -  
Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

---

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. habil. T. Q. Khanh, der mich als Doktorvater stets mit wertvollen Diskussionen und fachlichen Hinweisen unterstützte. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. E. Dörsam für die Übernahme des Korreferates.

Kein Doktorand kann ohne Unterstützer seine Ziele erreichen und so gilt mein Dank auch allen Mitarbeitern, Doktoranden, Studenten, Testpersonen und Korrekturlesern, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Natürlich ist ein solches Vorhaben ohne den Rückhalt der Familie nicht durchführbar – auch dafür bin ich sehr dankbar.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Beschreibung von Farbdifferenzen.....	4
2.1.1 Farbräume und Farbtafeln.....	5
2.1.2 Farbdifferenzformeln.....	6
2.1.3 Farberscheinungsmodelle .....	7
2.1.4 Wahrnehmungsschwelle und überschwellige Reize.....	8
2.1.5 Interpersonelle Streuung .....	12
2.1.6 Kategorisierte Beschreibung .....	15
2.1.7 Geeigneter Farbraum.....	17
2.2 Entwicklung der Farbwiedergabe-Definition.....	19
2.2.1 CIE-Farbwiedergabeindex 1965.....	20
2.2.2 CIE-Farbwiedergabeindex 1974/1995 .....	24
2.2.3 Verbesserungsvorschlag CRI 1996a .....	26
2.2.4 Ergänzende und ersetzende Berechnungsmethoden für Farbqualität .....	28
2.2.5 Vergleich von Gou und Houser .....	39
2.2.6 Vergleich von Jungnitsch.....	40
2.2.7 Kritik am CIE-Farbwiedergabeindex .....	43
2.2.8 Neudefinition des CIE-Farbwiedergabeindex: CRI 2012.....	46
2.3 LED-Binning .....	52
2.3.1 ANSI/NEMA Binning-Standard.....	53
2.3.2 Weiterentwicklungen.....	54
2.3.3 Probleme beim LED-Binning.....	54
<b>3 Zweikammer-Box-Versuch .....</b>	<b>59</b>
3.1 Aufbau und Durchführung.....	59
3.1.1 Lichtquellen.....	60
3.1.2 Testfarben .....	62
3.1.3 Fragebogen.....	65
3.1.4 Graukarte .....	67
3.1.5 Versuchspersonen.....	68
3.2 Auswertung der visuellen Bewertungen.....	69
3.2.1 Kategorisierte Bewertung .....	69
3.2.2 Graukarte .....	71
3.3 Testfarben.....	71



3.4	Geeigneter Farbraum.....	75
3.5	Farbtemperatur (CCT).....	77
3.6	Farbwiedergabeindex $R_a$ .....	79
<b>4</b>	<b>Ergänzender Versuch zu semantischen Kategorien.....</b>	<b>84</b>
4.1	Versuchsziele.....	84
4.2	Fragebogen und Versuchspersonen .....	84
4.3	Auswertung .....	86
4.4	Kategoriegrenzen .....	88
<b>5</b>	<b>Tabletop-Versuch.....</b>	<b>89</b>
5.1	Aufbau und Durchführung .....	89
5.1.1	Testobjekte.....	90
5.1.2	Lichtquellen.....	94
5.1.3	Fragebogen .....	95
5.1.4	Versuchspersonen und Durchführung .....	96
5.2	Kategorisierung der Farbdifferenzwahrnehmung .....	97
5.2.1	Beschreibende Funktion ermitteln.....	98
5.2.2	Berechnung von $\Delta E$ -Werten für die Kategorien .....	100
5.2.3	Vergleich zwischen Tabletop und Zweikammer-Box .....	102
5.3	Einfluss der Testobjekte.....	103
5.3.1	Buntton .....	103
5.3.2	Farbsättigung .....	105
5.3.3	Objektart .....	106
5.4	Lichtquellenspektrum bei konstantem $R_a$ .....	108
<b>6</b>	<b>Anwendung: Farbwiedergabe mit LED.....</b>	<b>111</b>
6.1	CIE CRI mit semantischen Kategorien .....	111
6.2	CRI 2012 mit semantischen Kategorien .....	114
<b>7</b>	<b>Anwendung: LED-Binning.....</b>	<b>116</b>
7.1	ANSI/NEMA Binning-Standard mit semantischen Kategorien .....	116
7.2	Vergleich mit anderen Forschungsergebnissen .....	120
<b>8</b>	<b>Diskussion und Ausblick .....</b>	<b>122</b>
8.1	Diskussion zur Farbwiedergabe .....	122
8.2	Diskussion zum LED-Binning.....	125
8.3	Zusammenfassung.....	126
8.4	Anregungen für zukünftige Arbeiten .....	127
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>128</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen und betreute Arbeiten .....</b>	<b>137</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Detaillergebnisse der Versuche .....</b>	<b>141</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Dokumentation zu den Versuchsaufbauten .....</b>	<b>169</b>

---

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

$\Delta E$	Farbdifferenz, berechneter geometrischer Abstand zwischen zwei Farbörtern
$\Delta E_{ab}^*$	Farbdifferenz im CIELAB-Farbraum (nur Farbinformationen, $a^*$ und $b^*$ )
$\Delta E_{CIELAB}$	Farbdifferenz im CIELAB-Farbraum (Farb- und Helligkeitsinformationen; $L^*$ , $a^*$ und $b^*$ )
$\Delta E_{vis}$	visueller Farbunterschied
$\Delta u'v'$	Farbdifferenz in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel
$a^*, b^*$	Farbachsen im CIELAB-Modell
$a_c, b_c$	Farbachsen im CIECAM02-Modell
$a', b'$	Farbachsen im CIECAM02-UCS-Modell
ANSI	American National Standards Institute
CCT	Correlated Colour Temperature, ähnlichste Farbtemperatur
CIE	internationale Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l'Éclairage)
CIECAM02	CIE Colour Appearance Model (2002), Farberscheinungsmodell der CIE
CIECAM02-UCS	Weiterentwicklung des CIECAM02-Farbraumes mit verbesserter Gleichabständigkeit (Uniform Colour Scale)
CIECAT02	CIE Colour Adaptation Transformation, Formel zur Berechnung der chromatischen Adaptation des Auges; Bestandteil von CIECAM02
CIEDE2000	Farbdifferenzformel der CIE
CIELAB, CIELUV	von der CIE standardisierte Farbräume
CRI	Colour Rendering Index, Farbwiedergabeindex
D65	Normlichtart der CIE
DIN99	nach DIN standardisierter Farbraum
$F, c, N_c$	Beobachtungsparameter im CIECAM02-Modell

---

---

$L_a$	Adaptationsleuchtdichte des Umfeldes im CIECAM02-Modell
LCD	Large Colour Difference, große Farbdifferenz
MBCCC	MacBeth Color Checker Chart
NEMA	The Association of Electrical Equipment and Medical Imaging Manufacturers
$R$	Rating, subjektive Beurteilung, visueller Farbunterschied
$R^2$	Korrelationskoeffizient nach Pearson
$R_a$	allgemeiner Farbwiedergabeindex (CIE CRI)
$R_i$	spezieller Farbwiedergabeindex für die Testfarbe $i$
SCD	Small Colour Difference, kleine Farbdifferenz
SDCM	Standard Deviation of Colour Matching
TCD	Threshold Colour Difference, Wahrnehmungsschwelle
$u', v'$	Farbachsen der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel
$V(\lambda)$	spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	Normspektralwertfunktionen
$X, Y, Z$	Normfarbwerte
$x, y, z$	Normfarbwertanteile, $x$ und $y$ stellen die Farbachsen der CIE 1931-Farbtafel dar
$Y_B$	mittlere Leuchtdichte der Szene im CIECAM02-Modell

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Farbige Objekte, beleuchtet mit Lichtquellen mit guter (links) und schlechter (rechts) Farbwiedergabe .....	3
Abbildung 2.2:	Darstellung von Abgleichergebnissen für 6 Filterkombinationen in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel [19] .....	10
Abbildung 2.3:	Wahrnehmungsschwellen nach MacAdam, dargestellt in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel, 10-fach vergrößert [19] .....	11
Abbildung 2.4:	SDCM-Ellipse (innen) und CIE94 $\Delta E = 1$ Ellipse (außen) um ein blaues Farbzentrum [46] .....	12
Abbildung 2.5:	Farbabgleichellipsen für drei Versuchspersonen (links: GF; Mitte: AR; rechts: GW) für den wiederholten Abgleich von vier Farbzentren (19, 23, 29 und 34), nach Wyszecki et. al. [31] .....	13
Abbildung 2.6:	Intra- und interpersonelle Abgleichunsicherheit (95% Konfidenz) in der CIELAB-Farbebene nach Alfvén und Fairchild [50] .....	14
Abbildung 2.7:	Wahrnehmbarkeit von sprunghaften Farbveränderungen entlang des Planckschen Kurvenzuges (links) und entlang der Juddschen Geraden (rechts) [61] .....	16
Abbildung 2.8:	Visuelle Testdaten (Daylight, SCD und LCD) in der CIELAB- (links) und CIECAM02-UCS-Farbtafel (rechts) [27] .....	17
Abbildung 2.9:	Visuelle Testdaten (Normlichtart A, SCD) in der CIELAB- (links) und CIECAM02-UCS-Farbebene (rechts) [27] .....	18
Abbildung 2.10:	Testfarben zur Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex $R_a$ 1965 [20] .....	20
Abbildung 2.11:	CRI-Testfarben unter D65-Beleuchtung in der CIECAM02-Farbebene .....	21
Abbildung 2.12:	Spektraler Reflexionsgrad der Testfarben (TCS) 1-8 für die Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex .....	22
Abbildung 2.13:	Spektraler Reflexionsgrad der Testfarben (TCS) 9-14 für die Berechnung der speziellen Farbwiedergabeindizes .....	22
Abbildung 2.14:	MacBeth Color Checker Chart (MBCCC) .....	26
Abbildung 2.15:	MBCCC-Testfarben 1-18 unter D65-Beleuchtung in der CIECAM02-Farbebene .....	27
Abbildung 2.16:	Spektraler Reflexionsgrad der MBCCC-Testfarben 1-12 .....	27
Abbildung 2.17:	Spektraler Reflexionsgrad der MBCCC-Testfarben 13-18 .....	28

Abbildung 2.18: Beispiel zur Berechnung der Color Rendering Capacity 1983 [80] .....	32
Abbildung 2.19: Prinzipielle Vorstellung der Color Rendering Capacity 1993 [9].....	32
Abbildung 2.20: Verschiebung der Farbörter unterschiedlicher Lichtquellen [82] .....	34
Abbildung 2.21: Orthogonale Gegenfarbspektralwertfunktionen nach Worthey: Durchgezogene Linie - $q_1(\lambda)$ proportional zur Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ ; Gepunktete Linie - $q_2(\lambda)$ rot-grün Gegenfarben; Gestrichelte Linie - $q_3(\lambda)$ blau-gelb Gegenfarben [82] .....	35
Abbildung 2.22: CQS-Testfarben [55] .....	37
Abbildung 2.23: CQS-Testfarben unter D65-Beleuchtung in der CIELAB-Farbebene.....	37
Abbildung 2.24: Versuchsaufbau für haploskopische Farbvergleiche nach Jungnitsch [94] .....	40
Abbildung 2.25: SBI-Fragebogen für visuelle Farbwiedergabetests nach Jungnitsch [94] .....	41
Abbildung 2.26: Indexwerte verschiedener Lichtarten nach [94] .....	42
Abbildung 2.27: Ablauf der Berechnungen für den CRI 2012 [67] .....	48
Abbildung 2.28: HL17-Testfarbensatz zur Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex [67].....	49
Abbildung 2.29: Real-Testfarbensatz zur Berechnung der speziellen Farbwiedergabeindizes unter D65-Beleuchtung [67] .....	50
Abbildung 2.30: Vorläufige Skalierung des CRI 2012.....	52
Abbildung 2.31: Standard-Binninggruppen des ANSI/NEMA-Binningstandards [127] .....	53
Abbildung 2.32: Definition der Binninggruppen im ABCS Automotive Binning Colour Standard [129] .....	54
Abbildung 2.33: Testaufbau nach Harbers et. al. [59], (a) Detailansicht, (b) typische Betrachtungssituation .....	56
Abbildung 2.34: Farbortverschiebung verschiedener weißer LEDs bei Temperaturerhöhung [133].....	57
Abbildung 3.1: Zweikammer-Box.....	59
Abbildung 3.2: Spektrale Verteilung der Lichtleistung (warmweiße Lichtquellen) .....	61
Abbildung 3.3: Spektrale Verteilung der Lichtleistung (neutralweiße Lichtquellen) .....	62
Abbildung 3.4: Einblick in die rechte Kammer .....	63
Abbildung 3.5: Ausgewählte Testfarben.....	63
Abbildung 3.6: Spektrale Reflexionsgrade der Testfarben.....	64
Abbildung 3.7: Farbörter der Testfarben unter Halogenglühlampen-Beleuchtung (CIECAM02-Farbebene) .....	65
Abbildung 3.8: Fragebogen für den Zweikammerbox-Versuch .....	66

Abbildung 3.9:	Graukarte .....	67
Abbildung 3.10:	Farnsworth Panel D-15 (links) und Lanthony Desaturated Panel D-15 (rechts) Farblegetests .....	69
Abbildung 3.11:	Fit einer Geraden an die mittleren <i>Percent</i> -Bewertungen in den fünf <i>Rating</i> - Kategorien .....	70
Abbildung 3.12:	Lage der Testfarben in der CIECAM02-Farbebene .....	72
Abbildung 3.13:	Vergleich der Bewertung ungesättigter und gesättigter Testfarben (Fehlerbalken: 95% Konfidenzintervall) .....	73
Abbildung 3.14:	Vergleich der Buntton-Gruppen (Fehlerbalken: 95% Konfidenzintervall) .....	73
Abbildung 3.15:	Vergleich der visuellen Bewertungen <i>Rating</i> (links) und $\Delta E_{vis}$ (rechts) für 2700 K und 4500 K; Zuordnung durch gleiche $\Delta u'v'$ -Werte .....	77
Abbildung 3.16:	Zusammenhang zwischen visuellen Bewertungen <i>Rating</i> und $\Delta E_{vis}$ für beide Farbtemperaturen .....	78
Abbildung 3.17:	Visuelle Werte <i>Rating</i> und $\Delta E_{vis}$ im Zusammenhang mit CIECAM02-UCS- Farbdifferenz .....	79
Abbildung 3.18:	Abhängigkeit der visuellen Bewertung von der Farbwiedergabegruppe .....	80
Abbildung 3.19:	Visuelles <i>Rating</i> (1 = tadellos, ..., 5 = sehr schlecht) für die Farbwiedergabegruppen, aufgetragen über der Farbdifferenz .....	81
Abbildung 3.20:	Visuelles $\Delta E_{vis}$ für die Farbwiedergabegruppen, aufgetragen über der Farbdifferenz .....	82
Abbildung 4.1:	Beispiel eines ausgefüllten Fragebogens .....	85
Abbildung 4.2:	Auswertung aller 10 Begriffe .....	86
Abbildung 4.3:	Auswertung der 7 ausgewählten Begriffe (jeweils Mittelwert und 95% Konfidenzintervall) .....	87
Abbildung 5.1:	Tabletop-Versuch .....	89
Abbildung 5.2:	Testobjekte aus Sicht der Versuchsperson .....	90
Abbildung 5.3:	Spektrale Reflexionsgrade der Testobjekte (Teil 1) .....	92
Abbildung 5.4:	Spektrale Reflexionsgrade der Testobjekte (Teil 2) .....	92
Abbildung 5.5:	Farbörter der Testobjekte unter Halogenglühlampen-Beleuchtung (CIECAM02 $a_c b_c$ -Ebene) .....	93
Abbildung 5.6:	Spektrale Strahlungsverteilung der Referenz- und Testlichtquellen .....	95
Abbildung 5.7:	Bedienoberfläche der Fragebogen-Software .....	96
Abbildung 5.8:	Gauss-Fit (durchgezogene Linie) der experimentellen visuellen Bewertungen R (Mittelwerte mit Standardabweichung) .....	99

Abbildung 5.9:	Vergleich der Bewertung (R auf Skala 0-100) der eigenen Tabletop-Ergebnisse sowie für CIE CRI (lange Striche) und CRI 2012 (kurze Striche und Punkte) .....	100
Abbildung 5.10:	Vergleich der kategorisierten visuellen Bewertung aus Tabletop- (rote Kurve, linke Skala) und Zweikammer-Box-Experiment (blaue Kurve, rechte Skala) – Mittelwerte und Standardabweichungen .....	102
Abbildung 5.11:	Verteilung der bewerteten Farbdifferenzen in beiden Experimenten .....	103
Abbildung 5.12:	Zusammenhang zwischen visueller Bewertung und Farbdifferenz nach Bunttongruppe .....	104
Abbildung 5.13:	Vergleich der Bewertung ungesättigter und gesättigter Testobjekte .....	105
Abbildung 5.14:	Vergleich der Bewertungen nach Objektart (rote Objekte) .....	106
Abbildung 5.15:	Vergleich der Bewertungen nach Objektart (gelbe Objekte) .....	107
Abbildung 5.16:	Vergleich der Bewertungen nach Objektart (alle Objekte) .....	108
Abbildung 5.17:	Spektrale Strahlungsverteilung von Testlichtquellen 1 und 3 sowie der Referenzlichtquelle .....	109
Abbildung 5.18:	Vergleich der Bewertungen für die Lichtquellen 1 und 3 .....	109
Abbildung 5.19:	Visuelle Bewertungen Rating für Lichtquellen 1 und 3, gegliedert nach Bunttonwinkel der Testobjekte .....	110
Abbildung 6.1:	Darstellung der semantischen Kategorien für das 2700 K ANSI-Farbzentrum; links CIECAM02-UCS $a'b'$ -Ebene, rechts CIE 1960 $uv$ -Farbtafel.....	112
Abbildung 6.2:	Vergleich Vortest-Skala (links, siehe Kapitel 4) und CIE CRI 1995 Indexwerte (rechts) für die 7 Kategorien .....	113
Abbildung 6.3:	Vergleich Vortest-Skala (links) und CRI 2012 Indexwerte (rechts) für die 7 semantischen Kategorien .....	114
Abbildung 7.1:	Darstellung der SDCM-Farbdifferenzen ( $\Delta u'v'$ konstant) und der mittleren Farbdifferenzen der 7 semantischen Kategorien in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel, beispielhaft für das Farbzentrum 4000 K des ANSI/NEMA Binning-Standards .....	117
Abbildung 7.2:	Vergleich der mittleren Farbdifferenzen $\Delta xy$ (CIE 1931) für SDCM-Farbdifferenzen und semantische Kategorien .....	118
Abbildung 7.3:	Vergleich der mittleren Farbdifferenzen $\Delta u'v'$ (CIE 1976) für SDCM-Farbdifferenzen und semantische Kategorien .....	118
Abbildung 7.4:	Vergleich der mittleren Farbdifferenzen $\Delta E$ (CIECAM02-UCS) für SDCM-Farbdifferenzen und semantische Kategorien .....	119

Abbildung 7.5:	Kategorisierte Bewertung und Wahrnehmbarkeit von sprunghaften Farbveränderungen entlang des Planckschen Kurvenzuges und entlang der Juddschen Geraden nach Bieske [61] .....	120
Abbildung A.1:	Vergleich der visuellen Bewertungen <i>Rating</i> (links; $R^2=0,74$ ; $p<0,001$ ) und $\Delta E_{vis}$ (rechts; $R^2=0,76$ ; $p<0,001$ ) beider CCTs; Zuordnung in der $u'v'$ -Farbtafel.....	141
Abbildung A.2:	Vergleich der visuellen Bewertungen <i>Rating</i> (links; $R^2=0,02$ ; $p=0,52$ ) und $\Delta E_{vis}$ (rechts; $R^2=0,27$ ; $p=0,034$ ) beider CCTs; Zuordnung im CIELAB-Farbraum .....	141
Abbildung A.3:	Vergleich der visuellen Bewertungen <i>Rating</i> (links; $R^2=0,42$ ; $p=0,0048$ ) und $\Delta E_{vis}$ (rechts; $R^2=0,63$ ; $p<0,001$ ) beider CCTs; Zuordnung im CIECAM02-UCS-Farbraum .....	142
Abbildung A.4:	Ergebnis für Testobjekt 1 (Rotkraut, künstlich) und Testobjekt 2 (rote Rose, künstlich) .....	144
Abbildung A.5:	Ergebnis für Testobjekt 3 (Banane, natürlich) und Testobjekt 4 (Zitrone, künstlich) .....	144
Abbildung A.6:	Ergebnis für Testobjekt 5 (Apfel, künstlich) und Testobjekt 6 (grünes Blatt, künstlich) .....	145
Abbildung A.7:	Ergebnis für Testobjekt 7 (rosa Rose, natürlich) und Testobjekt 8 (Enzian, künstlich) .....	145
Abbildung A.8:	Ergebnis für Testobjekt 9 (Orange, natürlich) und Testobjekt 10 (Farbfeld Hautton) .....	146
Abbildung A.9:	Ergebnis für Testobjekt 11 (Farbfeld türkis) und Testobjekt 12 (Farbfeld hellgrün) .....	146
Abbildung A.10:	Ergebnis für Testobjekt 13 (Farbfeld rot) und Testobjekt 14 (Farbfeld gelb) .....	147
Abbildung A.11:	Ergebnis für die Bunttongruppen Rot und Orange .....	148
Abbildung A.12:	Ergebnis für die Bunttongruppen Gelb und Grün .....	148
Abbildung A.13:	Ergebnis für die Bunttongruppen Türkis und Blau .....	149
Abbildung A.14:	Ergebnis für die Bunttongruppe Violett .....	149
Abbildung A.15:	Vergleich für drei Farbzentren in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel.....	153
Abbildung A.16:	Vergleich für das Farbzentrum 2700 K in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel .....	153
Abbildung A.17:	Vergleich für das Farbzentrum 3000 K in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel .....	154
Abbildung A.18:	Vergleich für das Farbzentrum 3500 K in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel .....	154
Abbildung A.19:	Vergleich für das Farbzentrum 4000 K in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel .....	155
Abbildung A.20:	Vergleich für das Farbzentrum 4500 K in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel .....	155



Abbildung A.21: Vergleich für das Farbzentrum 5000 K in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel.....	156
Abbildung A.22: Vergleich für das Farbzentrum 5700 K in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel.....	156
Abbildung A.23: Vergleich für das Farbzentrum 6500 K in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel.....	157
Abbildung A.24: Übersicht der Farbdifferenzen $\Delta xy$ .....	157
Abbildung A.25: Vergleich für drei Farbzentren in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel .....	158
Abbildung A.26: Vergleich für das Farbzentrum 2700 K in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel.....	158
Abbildung A.27: Vergleich für das Farbzentrum 3000 K in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel.....	159
Abbildung A.28: Vergleich für das Farbzentrum 3500 K in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel.....	159
Abbildung A.29: Vergleich für das Farbzentrum 4000 K in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel.....	160
Abbildung A.30: Vergleich für das Farbzentrum 4500 K in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel.....	160
Abbildung A.31: Vergleich für das Farbzentrum 5000 K in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel.....	161
Abbildung A.32: Vergleich für das Farbzentrum 5700 K in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel.....	161
Abbildung A.33: Vergleich für das Farbzentrum 6500 K in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel.....	162
Abbildung A.34: Übersicht der Farbdifferenzen $\Delta u'v'$ .....	162
Abbildung A.35: Vergleich für drei Farbzentren in der CIECAM02-UCS $a'b'$ -Farbebene (Teil 1) .....	163
Abbildung A.36: Vergleich für drei Farbzentren in der CIECAM02-UCS $a'b'$ -Farbebene (Teil 2) .....	163
Abbildung A.37: Vergleich für das Farbzentrum 2700 K in der CIECAM02-UCS $a'b'$ - Farbebene .....	164
Abbildung A.38: Vergleich für das Farbzentrum 3000 K in der CIECAM02-UCS $a'b'$ - Farbebene .....	164
Abbildung A.39: Vergleich für das Farbzentrum 3500 K in der CIECAM02-UCS $a'b'$ - Farbebene .....	165
Abbildung A.40: Vergleich für das Farbzentrum 4000 K in der CIECAM02-UCS $a'b'$ - Farbebene .....	165
Abbildung A.41: Vergleich für das Farbzentrum 4500 K in der CIECAM02-UCS $a'b'$ - Farbebene .....	166
Abbildung A.42: Vergleich für das Farbzentrum 5000 K in der CIECAM02-UCS $a'b'$ - Farbebene .....	166
Abbildung A.43: Vergleich für das Farbzentrum 5700 K in der CIECAM02-UCS $a'b'$ - Farbebene .....	167
Abbildung A.44: Vergleich für das Farbzentrum 6500 K in der CIECAM02-UCS $a'b'$ - Farbebene .....	167

---

Abbildung A.45: Übersicht der Farbdifferenzen $\Delta E$ (CIECAM02-UCS) .....	168
Abbildung B.1: Anordnung der LEDs auf dem LED-Board .....	169
Abbildung B.2: Fragebogen für den Zweikammer-Box-Versuch.....	171
Abbildung B.3: Fragebogen zur Kategoriebenennung (vor dem Ausfüllen) .....	172
Abbildung B.4: Ausgefüllter Fragebogen zur Kategoriebenennung (blauer Stift = Versuchsperson, roter Stift = Auswertung) .....	173
Abbildung B.5: Screenshot der Fragebogen-Software für den Tabletop-Versuch .....	175

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Übersicht zur Größe von Farbdifferenzen .....	4
Tabelle 2.2:	Übersicht über visuelle Farbabgleichexperimente, unterschieden nach Größe der Farbdifferenz .....	9
Tabelle 2.3:	Farbabweichungen für die Kategorien nach Bieske .....	16
Tabelle 2.4:	Farbdifferenzen (CIELAB und CIEDE2000) und deren Bewertung nach Kraushaar [62].....	16
Tabelle 2.5:	Spektralbänder der CIE-Spektralbandmethode .....	19
Tabelle 2.6:	Munsell-Werte der Testfarben.....	21
Tabelle 2.7:	Farbörter der präferierten Farben und deren Gewichtung .....	29
Tabelle 2.8:	CQS-Referenzfarbfaktoren für verschiedene ähnlichste Farbtemperaturen .....	38
Tabelle 2.9:	Bewertung von Farbdifferenzen nach Harbers et al. [59], CCT $\approx$ 3000 K.....	56
Tabelle 3.1:	Warmweiße Lichtquellen (CCT ca. 2700 K) .....	60
Tabelle 3.2:	Neutralweiße Lichtquellen (CCT ca. 4500 K) .....	61
Tabelle 3.3:	Verteilung der CIELAB $L^*$ -Werte (Sollwerte) auf der Graukarte .....	67
Tabelle 3.4:	Farbwerte der stichprobenartig vermessenen Graukartenfelder (CIECAM02-UCS) .....	68
Tabelle 3.5:	Vergleich der Fragebogenelemente untereinander (Korrelation $r$ nach Pearson, Bestimmtheitsmaß $R^2$ , Signifikanz $p$ und 2-seitiger T-Test) .....	70
Tabelle 3.6:	Interpersonelle Streuung ohne und mit Graukarte.....	71
Tabelle 3.7:	Zusammenfassung der Testfarben zu Gruppen .....	72
Tabelle 3.8:	Übereinstimmung der Farbgruppen (Bestimmtheitsmaß $R^2$ ) .....	74
Tabelle 3.9:	Korrelationskoeffizienten $r$ (nach Pearson) zwischen visuellen Antworten und berechneten Farbdifferenzen .....	76
Tabelle 3.10:	Korrelationskoeffizienten $r$ zwischen z-transformierten visuellen Antworten und berechneten Farbdifferenzen .....	76
Tabelle 3.11:	Einteilung der Testlichtquellen in $R_a$ -Gruppen .....	80
Tabelle 3.12:	Korrelation zwischen den <i>Rating</i> -Bewertungen der Farbwiedergabegruppen (Bestimmtheitsmaß $R^2$ ) .....	81
Tabelle 3.13:	Korrelation zwischen den $\Delta E_{vis}$ -Bewertungen der Farbwiedergabegruppen (Bestimmtheitsmaß $R^2$ ) .....	82

Tabelle 4.1:	Auswertung aller 10 Begriffe.....	86
Tabelle 4.2:	Auswertung der 7 ausgewählten Begriffe.....	87
Tabelle 4.3:	Werte für die Übereinstimmung zweier Farbproben .....	88
Tabelle 5.1:	Vor- und Nachteile der verschiedenen Objektarten .....	90
Tabelle 5.2:	Übersicht der ausgewählten Testobjekte .....	91
Tabelle 5.3:	Mischung der Lichtquellen aus Halogenlampen, RGB- und weißen LEDs.....	94
Tabelle 5.4:	Visuelle Bewertungen des Tabletop-Versuchs.....	98
Tabelle 5.5:	Farbdifferenzwerte für die semantischen Kategorien .....	101
Tabelle 5.6:	Bestimmtheitsmaße für den Gesamt-Fit und individuell gefittete Funktionen jeder Bunttongruppe .....	104
Tabelle 5.7:	Zusammenfassung der Testobjekte zu Farbsättigungsgruppen.....	105
Tabelle 5.8:	Zusammenfassung der Testobjekte zu Gruppen gleicher Objektart .....	107
Tabelle 6.1:	Zuordnung zwischen visueller Kategorie und mittlerer Farbdifferenz .....	111
Tabelle 6.2:	Beispielhafte Farbwerte für eine Kontur (Kategorie „sehr gut“, Farbzentrum 2700 K) .....	112
Tabelle 6.3:	Indexwerte des CIE Farbwiedergabeindex (1995).....	113
Tabelle 6.4:	Indexwerte des Vortests (siehe Abschnitt 4) und des CRI 2012 ( $k = 1/55$ , $k$ $= 2/45$ und $k = 1/12$ ) .....	115
Tabelle 7.1:	Vergleich der visuellen Kategorien nach Bieske [61] mit den eigenen Ergebnissen .....	120
Tabelle 7.2:	Vergleich der Bewertung nach Harbers et. al. [59] mit den eigenen Ergebnissen, Warmweiß 3000 K.....	121
Tabelle 8.1:	Vergleich des Zusammenhanges zwischen Farbdifferenz und visuellem Farbunterschied .....	123
Tabelle 8.2:	Semantische Kategorien mit zugeordneten Werten auf der Bewertungsskala $R$ sowie Farbdifferenzen $\Delta E$ .....	126
Tabelle A.1:	Leuchtdichtestabilität während der Versuchsdurchführung .....	143
Tabelle A.2:	Bestimmtheitsmaße für den Gesamt-Fit und individuell gefittete Funktionen jeder Bunttongruppe .....	147
Tabelle A.3:	CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 2700 K.....	150
Tabelle A.4:	CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 3000 K.....	150
Tabelle A.5:	CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 3500 K.....	151
Tabelle A.6:	CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 4000 K.....	151

---

Tabelle A.7:	CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 4500 K.....	151
Tabelle A.8:	CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 5000 K.....	152
Tabelle A.9:	CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 5700 K.....	152
Tabelle A.10:	CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 6500 K.....	152
Tabelle B.1:	Auf dem LED-Board installierte Lichtquellen .....	170
Tabelle B.2:	Liste der Versuchsdurchläufe für den Zweikammer-Box-Versuch.....	170
Tabelle B.3:	Liste der Versuchsdurchläufe für den Tabletop-Versuch .....	174

---

## Kurzfassung

Als wirtschaftlich bedeutendste Halbleiter-Lichtquelle hat sich die lichtemittierende Diode (LED) in der Beleuchtungstechnik etabliert. Zur Beurteilung der Farbqualität von Lichtquellen wird häufig der Farbwiedergabeindex verwendet, dessen numerischer Wert aber für Anwender nicht immer leicht interpretierbar ist. Die Beschreibung mit Hilfe von Ankerbegriffen (semantischen Kategorien) ermöglicht eine leicht interpretierbare Erfassung.

Als Grundlage zur farbmtrischen Beschreibung wird der Farbraum CIECAM02-UCS empfohlen. Weiterhin wird in dieser Arbeit ein Zusammenhang zwischen empfundenem Farbunterschied und gemessener Farbdifferenz hergestellt. Es wird gezeigt, dass die Beschreibung der empfundenen Farbunterschiede mit Hilfe von semantischen Kategorien sowohl für die Anwendung in der Farbwiedergabe als auch für das Binning von Lichtquellen sinnvoll ist. Auf einer Bewertungsskala  $R$  (Intervallskala mit den Endpunkten „0“ und „100“) sollte die Anordnung der Begriffe wahrnehmungsgemäß – d. h. nicht zwangsläufig gleichabständig – erfolgen.

Werden die semantischen Kategorien auf den CIE CRI übertragen, so entspricht  $R_a = 80$  einer „guten“ (Warmweiß) bzw. „guten“ bis „mäßigen“ (Neutral- und Kaltweiß) Übereinstimmung zweier Farbproben.  $R_a = 90$  entspricht etwa einer „sehr guten“,  $R_a = 95$  schließlich einer „ausgezeichneten“ Übereinstimmung.

Der ANSI/NEMA Binning-Standard definiert Bin-Größen von  $\Delta u'v' \approx 0,007$ . Diese Definition entspricht einer „geringen“ visuellen Übereinstimmung zweier Farbproben (Neutral- und Kaltweiß), im Warmweiß-Bereich sogar nur einer „schlechten“ bis „sehr schlechten“ Übereinstimmung. Zusätzlich sind „1/4 Bins“ ( $\Delta u'v' \approx 0,004$ ) und „1/16 Bins“ ( $\Delta u'v' \approx 0,002$ ) definiert, sie entsprechen „guter“ bis „mäßiger“ Übereinstimmung (1/4 Bin) bzw. einer knapp „sehr guten“ Übereinstimmung (1/16 Bin). Eine „ausgezeichnete“ Übereinstimmung wird von keiner der ANSI/NEMA Binninggruppen erreicht.

---

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Heute stehen uns eine Reihe von künstlichen Lichtquellen für Beleuchtungsaufgaben zur Verfügung. Neben thermischen Strahlern (Glühlampen) und Entladungslampen bilden die Halbleiterlichtquellen eine dritte bedeutende Gruppe. Praktische Bedeutung haben dabei heute vor allem lichtemittierende Dioden (LEDs), Laserdioden beispielsweise spielen gegenüber LEDs eine untergeordnete Rolle.

Den wirtschaftlich bedeutendsten Markt für Halbleiterlichtquellen stellt die Innenraumbeleuchtung dar. Für die Beleuchtung von Büros und Wohnungen spielt neben photometrischen und farbmtrischen Parametern wie Lichtstrom und Farbtemperatur die Farbqualität einer Lichtquelle eine wichtige Rolle. Eine gute Lichtquelle zeichnet sich nicht allein durch eine hohe Lichtausbeute (gemessen in Lumen pro Watt) aus, sondern auch durch gute Farbqualitätseigenschaften wie gute Farbwiedergabe. Zur Quantifizierung der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lichtquelle hat sich heute der Farbwiedergabeindex (colour rendering index, CRI) der internationalen Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) durchgesetzt.

Dieser Index bietet einen numerischen Wert und überlässt es dem Anwender eine Interpretation dafür zu finden. Eine Verknüpfung der Indexwerte mit semantischen Kategorien (z. B. „gut“, „sehr gut“ usw.) würde die Kommunikation zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern von Beleuchtungsprojekten vereinfachen und Käufer von Lampen und Leuchten unterstützen. Eine solche Verknüpfung soll in dieser Arbeit hergestellt werden.

Einen weiteren Aspekt stellen Sortier- und Auswahlprozesse (Binning) von Lichtquellen dar. Solche Prozesse sollen das gleichmäßige Erscheinungsbild von Multichip-LED-Leuchten beispielsweise in der Innenraumbeleuchtung, in der Display-Hintergrundbeleuchtung oder in Automobil-Heckleuchten gewährleisten. Die Grundlage für die Beurteilung stellt auch hier die Bewertung von Farbdifferenzen dar. Die Anwendung der kategorisierten Farbdifferenzbewertung kann also auch hier die Kommunikation unter Projektbeteiligten vereinfachen. Darauf soll in dieser Arbeit eingegangen werden.

Nach der Zusammenfassung des Standes der Forschung zu den Themen Beschreibung von Farbdifferenzen, Farbwiedergabe und Binning-Definition (Kapitel 2) werden drei Probandenexperimente vorgestellt und ausgewertet (Kapitel 3, 4 und 5). Anschließend wird die gefundene kategorisierte Beschreibung auf die Gebiete Farbwiedergabe und Binning angewendet (Kapitel 6 und 7). In Kapitel 8 werden die Ergebnisse zusammenfassend diskutiert und Ansätze für die weitere Bearbeitung der Themen aufgezeigt.

## Zielsetzung

Die Forschungsziele dieser Arbeit können in Thesen zusammengefasst werden:

- 
- A Es lässt sich experimentell ein Zusammenhang zwischen empfundenem Farbunterschied und gemessener Farbdifferenz herstellen. Damit wird es ermöglicht das Probandenurteil auf messtechnischem Weg vorherzusagen.
  - B Dieser Zusammenhang ist allgemeingültig, d. h. unabhängig von der Farbe des Testreizes und der Objektart (homogenes Farbfeld oder dreidimensionales Objekt wie Obst etc.). Auch die Farbtemperatur der Lichtquelle spielt in diesem Zusammenhang keine Rolle.
  - C Der moderne Farbraum CIECAM02-UCS ist die beste Grundlage für die Vorhersage empfundener Farbunterschiede.
  - D Im Experiment führt die Verankerung der visuellen Antworten mit Hilfe von Referenzreizen (Graukarte) zu einer verbesserten Korrelation der empfundenen Farbunterschiede mit den gemessenen Farbdifferenzen.
  - E Eine Beschreibung der empfundenen Farbunterschiede in Kategorien (z. B. sehr gute / gute / schlechte Übereinstimmung) erleichtert die Kommunikation zwischen Geschäftspartnern bei der Farbqualitätsbeurteilung von Lichtquellen. Dies trifft sowohl auf die Beschreibung der Farbwiedergabe als auch auf den Bereich Binning zu.
  - F Die Ankerbegriffe (Kategoriebezeichnungen, z. B. „sehr gut“) sollen auf einer Intervallskala empfindungsgemäß angeordnet werden. Möglicherweise resultiert daraus eine nicht gleichabständige Anordnung.

Entsprechend leiten sich daraus die Zielsetzungen für diese Arbeit ab:

1. Der Zusammenhang zwischen gemessener Farbdifferenz und empfundenem Farbunterschied soll hergestellt werden. Die beschreibende Formel soll invertierbar sein. Damit wird sowohl eine Vorhersage von (kategorisierten) Farbunterschieden aus Messdaten ermöglicht als auch die Berechnung von Farbdifferenzwerten zu den entsprechenden Farbunterschiedskategorie-Mittelwerten und -Grenzen.
2. Es sollen intuitiv verständliche Begriffe für die wahrgenommene Größe von Farbunterschieden gefunden werden. Im normalen Sprachgebrauch unübliche und deshalb nicht intuitiv verständliche Bezeichnungen sollen identifiziert und aussortiert werden.
3. Die gefundenen Begriffe sollen auf einer Intervallskala mit den Endpunkten „0“ und „100“ angeordnet werden. Damit können den Begriffen Zahlenwerte zwischen 0 und 100 zugeordnet werden.
4. Die gefundene Skala mit den Ankerbegriffen soll auf den CIE CRI sowie den zur Standardisierung vorgeschlagenen CRI 2012 angewendet werden. Die Zuordnung der Begriffe zu CRI- bzw. CRI 2012-Werten soll diskutiert werden.
5. Die Skala soll ebenfalls auf den ANSI Binning-Standard angewendet und die Größe von Binninggruppen im Zusammenhang mit den gefundenen Begriffen diskutiert werden.



---

## 2 Stand der Forschung

Ein wichtiges Beurteilungskriterium für die Auswahl von Lichtquellen für Beleuchtungszwecke ist die Farbwiedergabe [1]. In vielen Anwendungen wie beispielsweise die Beleuchtung von Verkaufsflächen, Büros und sonstigen Innenräumen spielt die Akzeptanz der wahrgenommenen Farben durch den Betrachter eine wesentliche Rolle.

Die internationale Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) definiert Farbwiedergabe (colour rendering) als “effect of an illuminant on the color appearance of objects by conscious or subconscious comparison with their color appearance under a reference illuminant” [2]. Per Definition werden also zwei Farberscheinungen miteinander verglichen, unter der Referenzlichtart und der zu testenden Lichtart. Als Referenzlichtart wird üblicherweise eine farbtemperaturgleiche Planck- oder Tageslichtart verwendet (siehe auch Abschnitt 2.2.1 Bestimmung der Referenzlichtart).



Abbildung 2.1: Farbige Objekte, beleuchtet mit Lichtquellen mit guter (links) und schlechter (rechts) Farbwiedergabe

Zusätzlich zum Begriff der Farbwiedergabe werden zur Beschreibung der Qualität von Lichtquellen weitere Begriffe wie Farbpräferenz [3] [4], Farbharmonie [5] [6] und Gamut Area [7] [8] [9] verwendet.

Das sogenannte „Binning“ von LEDs bezeichnet den Sortierprozess, in dem trotz großer Produktionsschwankungen zueinander passende LEDs derselben Gruppe zugeordnet werden [10]. Sortierkriterien können dabei z. B. Farbort, Lichtstrom oder Vorwärtsspannung sein.

Sowohl zur Beschreibung der Farbwiedergabe als auch für das Binning von LEDs ist die Modellierung der Wahrnehmung von Farbdifferenzen notwendig. Mit Hilfe der gefundenen Farbdifferenz-Formeln kann dann die Güte der Farbwiedergabe und die sinnvolle Größe von Binninggruppen vorausberechnet werden.

## 2.1 Beschreibung von Farbdifferenzen

Die Grundlage für eine farbmetrische Beschreibung stellt die Bewertung eines spektralen Reizes  $S(\lambda)$  durch Normspektralwertfunktionen dar. Die CIE definierte dazu bereits im Jahr 1931 die Normspektralwertfunktionen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  des 2°-Normalbeobachters [11, 12], 1964 folgte die Definition des 10°-Normalbeobachters für ein auf 10° vergrößertes Beobachtungsfeld [12]. Aus dieser spektralen Bewertung resultieren die Normfarbwerte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  für den 2°-Normalbeobachter bzw.  $X_{10}$ ,  $Y_{10}$  und  $Z_{10}$  für den 10°-Normalbeobachter. Sie dienen als Ausgangsbasis für Farbräume wie CIELAB und Farberscheinungsmodelle wie CIECAM02.

Unter *visuellem Farbunterschied* wird in dieser Arbeit der Unterschied in der Wahrnehmung zweier Farben verstanden, verursacht z. B. durch eine Änderung der Oberflächenfarbe oder eine Änderung der beleuchtenden Lichtquelle. Visuelle Farbunterschiede werden in Probandenexperimenten ermittelt.

Im Gegensatz dazu lassen sich *berechnete Farbdifferenzen*  $\Delta E$  ohne die Durchführung eines Experimentes aus Messdaten berechnen. Sowohl der aktuelle Farbwiedergabeindex der CIE als auch die meisten vorgeschlagenen Farbwiedergabe-Beschreibungen basieren auf der Bewertung von Farbdifferenzen. In einem *visuell gleichabständigen Farbraum* [13] handelt es sich dabei um den euklidischen Abstand zwischen zwei Punkten, in Formel 2.1 beispielhaft für den Farbraum CIELAB mit den Achsen  $L$ ,  $a$  und  $b$  dargestellt.

$$\Delta E_{CIELAB} = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad \text{Formel 2.1}$$

In einigen Fällen werden Farbdifferenzen in Farbebenen berechnet, ohne Einbeziehung von Helligkeitsinformation.

$$\Delta E_{CIELAB} = \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad \text{Formel 2.2}$$

Je nach Größe der Farbdifferenz  $\Delta E$  wird zwischen drei Gruppen unterschieden:

- Wahrnehmungsschwelle (Threshold Colour Difference, TCD)
- Kleine Farbdifferenz (Small Colour Difference, SCD)
- Große Farbdifferenz (Large Colour Difference, LCD)

Tabelle 2.1: Übersicht zur Größe von Farbdifferenzen

Autor	TCD	SCD	LCD
Wang et. al. (2011) [14]	$\Delta E_{CIELAB} < 1$	$\Delta E_{CIELAB} < 5$	$\Delta E_{CIELAB} > 10$
Zhu et. al. (2011) [15]		$\Delta E_{CIELAB} < 5$	$\Delta E_{CIELAB} \approx 10$
Kuehni (2001) [16]		$\Delta E_{CIELAB} < 6$	

---

Es gibt keine feste Definition ab welchem  $\Delta E$ -Wert von kleinen oder großen Farbdifferenzen gesprochen wird. Es zeigen sich aber übliche Werte, wie Tabelle 2.1 zeigt. Ein Ziel bei der Entwicklung von Farbräumen ist es, mit  $\Delta E = 1$  wie Wahrnehmungsschwelle zu beschreiben.

Grundlage vieler Berechnungen der höheren Farbmeterik ist die Verknüpfung beider Größen, d. h. der Versuch den empfundenen Farbunterschied mit der gemessenen Farbdifferenz vorherzusagen.

Für die Berechnung von Farbdifferenzen sind zwei Wege denkbar:

1. Berechnung des euklidischen Abstandes zweier Farböbter in einem visuell gleichabständigen Farbraum oder
2. Nutzung einer speziell angepassten Farbdifferenzformel in einem visuell nicht gleichabständigen Farbraum.

Im folgenden Abschnitt werden die Farbräume, Farbdifferenzformeln und Farberscheinungsmodelle in Erinnerung gerufen, die für die Beschreibung von Farbdifferenzen eine praktische Bedeutung haben.

### 2.1.1 Farbräume und Farbtafeln

Farbräume sind Räume, die von drei unabhängigen farbmtrischen Koordinaten aufgespannt werden. Im Gegensatz dazu beinhalten Farbtafeln nur zwei Dimensionen, häufig wird dabei die Farbinformation erhalten während Informationen über die Helligkeit fehlen.

#### CIELUV und die $uv$ - und $u'v'$ -Farbtafeln

Nach der Einführung des Normvalenzsystems CIEXYZ durch die CIE im Jahr 1931 stellte man fest, dass geometrische Abstände in diesem System schlecht mit empfundenen Farbunterschieden übereinstimmen. Durch Transformationen der Normfarbwertanteile  $xy$  erhält man die Koordinaten der 1960 CIE-UCS-Farbtafel ( $uv$ ) und der verbesserten 1976 CIE-UCS-Farbtafel ( $u'v'$ ) [12, 17]. Aus den Normfarbwerten  $XYZ$  können die Farbwerte des 1976 CIELUV-Farbraums ermittelt werden [18]. Dieser enthält neben den  $u^*$ - und  $v^*$ -Farbachsen die empfindungsgemäße Helligkeitsachse  $L^*$ . Bei der Berechnung der  $L^*u^*v^*$ -Koordinaten wird Bezug auf ein Referenzweiß genommen. Farbdifferenzen  $\Delta E_{CIELUV}$  können entsprechend Formel 2.1 aus den  $L^*u^*v^*$ -Koordinaten des CIELUV-Farbraumes gebildet werden. In der 1976 CIE-UCS-Farbtafel wird Formel 2.2 mit den Koordinaten  $u'v'$  verwendet. Die ermittelte Farbdifferenz wird dann häufig mit  $\Delta u'v'$  statt  $\Delta E_{uv}$  bezeichnet.

Grundlage für die Entwicklungen der CIE-UCS-Farbtafeln und des CIELUV-Farbraumes sind die Experimente von MacAdam [19]. Dabei wurde die Wahrnehmungsschwelle untersucht, nicht kleine oder große Farbdifferenzen.

Während den bisher besprochenen Farbordnungssystemen der CIE 1931 2°-Normalbeobachter zugrunde liegt, wird für den 1964 CIEUVW-Farbraum der CIE 1964 10°-Normalbeobachter benutzt.

---

Der CIEUVW-Farbraum mit den Koordinaten  $U^*$ ,  $V^*$  und  $W^*$  wird von der seit 1974 gültigen Definition des CIE-Farbwiedergabeindex benutzt [20].

## CIELAB und die $a^*b^*$ -Farbtafel

Der 1976 von der CIE standardisierte CIELAB-Farbraum beinhaltet die Koordinaten  $L^*$  (relative Helligkeit),  $a^*$  und  $b^*$  (Farbwerte) [21]. Entsprechend der Gegenfarbtheorie liegen sich auf der  $a^*$ -Achse Rot und Grün gegenüber, auf der  $b^*$ -Achse Gelb und Blau. Für die Umrechnung von 1931 CIE XYZ-Normfarbwerten in den CIELAB-Farbraum werden diese auf einen Weißpunkt  $X_W Y_W Z_W$  bezogen. Dadurch erhalten Unbunttöne (Grauwerte) die Koordinaten  $a^* = b^* = 0$ , unabhängig von der beleuchtenden Lichtquelle.

Farbdifferenzen  $\Delta E_{L^*a^*b^*}$  werden entsprechend Formel 2.1 gebildet, unter Vernachlässigung der Helligkeitsinformation auch in der  $a^*b^*$ -Farbtafel gemäß Formel 2.2. CIELAB basiert auf experimentellen Daten von Newhall und Nickerson [22] mit großen Farbdifferenzen (LCD). In der grafischen Industrie hat CIELAB bis heute große Bedeutung bei der Beschreibung von Farben und Farbunterschieden.

## DIN99

DIN99 stellte eine Weiterentwicklung des CIELAB-Farbraumes dar. Er bietet eine verbesserte empfindungsgemäße Gleichabständigkeit. Im Gegensatz zur parallel entwickelten Farbdifferenzformel CIEDE2000 [23] stellt DIN99 [24] einen echten Farbraum dar. Zur Farbdifferenzberechnung werden die bisherigen euklidischen Formeln benutzt. Entwickelt wurde DIN99 für kleine bis mittlere Farbdifferenzen (bis  $\Delta E \approx 5$ ).

### 2.1.2 Farbdifferenzformeln

Der zweite mögliche Weg zur Berechnung einer Farbdifferenz führt über die Verwendung eines nicht gleichabständigen Farbraumes und einer speziell angepassten – über die einfache euklidische Form hinausgehenden – Farbdifferenzformel.

1984 wurde durch die „Society of Dyers and Colourists“ die CMC-Formel veröffentlicht. Sie stellt den Nachfolger der JPC79-Formel dar [25]. 1995 wurde von der CIE die Farbdifferenzformel CIE94 vorgestellt [26], deren Nachfolger wiederum die CIEDE2000-Formel [23] darstellt. CIEDE2000 ist die aktuelle Farbdifferenzformel der CIE.

Alle erwähnten Farbdifferenzformeln basieren auf dem CIELAB-Farbraum und verbessern dessen Gleichabständigkeit. Die Formeln wurden mit Hilfe von experimentellen Daten zu kleinen Farbdifferenzen (SCD) erstellt und bieten in diesem Bereich deutliche Vorteile gegenüber dem euklidischen Abstand im CIELAB-Farbraum (CIELAB selbst basiert auf LCD-Daten).

---

### 2.1.3 Farberscheinungsmodelle

Farberscheinungsmodelle berücksichtigen neben der chromatischen Adaptation der betrachtenden Person auch Umfeldparameter, die für die Wahrnehmung von Farben eine Rolle spielen. So geht beispielsweise die Umfeldleuchtdichte in die Berechnung der wahrgenommenen Farberscheinung ein. Eingeschlossen in diese Berechnung ist die Bildung eines gleichabständigen Farbraumes – ideale Voraussetzungen zur Berechnung von Farbdifferenzen.

Luo et. al. [27] beschreibt die universelle Anwendbarkeit von Farberscheinungsmodellen für die drei Bereiche

1. Farbspezifikation,
2. Feststellen von Farbdifferenzen und
3. Vorhersage der Farberscheinung.

Kritische Punkte für einen Farbraum sind demnach:

- Er muss sowohl im Bereich kleiner als auch großer Farbdifferenzen (SCD/LCD) gleichabständig sein.
- Die Eigenschaften müssen gleichermaßen für Lichtquellen niedriger und hoher Farbtemperatur (z. B. Normlichtart A und Daylight) erhalten bleiben.

Da visuelle Farbabgleichexperimente oft nur für einen Teil dieser Bedingungen durchgeführt werden, müssen zur Entwicklung von Farbwahrnehmungsmodellen gegebenenfalls Daten aus verschiedenen Experimenten kombiniert werden (siehe auch Tabelle 2.2).

### CIECAM02

Als Nachfolger von CIECAM97s stellt CIECAM02 [28] das aktuelle Farbwahrnehmungsmodell der CIE dar. Das Modell berechnet die wahrgenommene Farberscheinung einer etwa 4° großen Farbprobe vor einem Hintergrund (Adaptationsfeld). Außerdem werden Umgebungseinflüsse berücksichtigt (Betrachtung in einem dunklen Raum etc.).

Eingangsparameter sind neben den Normfarbwerten des Farbreizes XYZ auch die Werte des Weißpunktes  $X_W Y_W Z_W$ , die mittlere Leuchtdichte des Adaptationsfeldes  $L_A$ , die mittlere Leuchtdichte der gesamten Szene  $Y_B$  sowie die Umgebungsparameter  $F$ ,  $c$  und  $N_c$ . Üblich ist die Verwendung der Parameter  $F = 1$ ,  $c = 0,69$  und  $N_c = 1$  (durchschnittliche helle Umgebung) sowie  $Y_B = \frac{1}{5} L_A$ . Das Modell berechnet den Grad der Adaptation  $D$  mit Wertebereich 0...1, wobei 1 der vollständigen Adaptation auf das Adaptationsfeld entspricht.

Ausgangsparameter des Modells sind unter anderem die Parameter  $J$ ,  $a_c$  und  $b_c$ , woraus sich analog zu  $L^*a^*b^*$  des CIELAB-Farbraumes Farbdifferenzen berechnen lassen.

Das Modell ist invertierbar, d. h. es existiert das entsprechende Rückwärts-Modell um beispielsweise von  $J a_c b_c$  in XYZ umzurechnen.

---

## CIECAM02-SCD, -LCD und -UCS

Diese Weiterentwicklungen des CIECAM02-Farbraumes wurden 2006 von Luo et. al. [27] vorgestellt. Es werden die Daten zusätzlicher visueller Experimente mit kleinen und großen Farbdifferenzen (SCD/LCD) verwendet, um die Werte für drei zusätzliche Parameter ( $K_L$ ,  $c_1$  und  $c_2$ ) zu finden. Mit diesen Parametern können aus dem CIECAM02-Farbraum die Koordinaten eines modifizierten Farbraumes errechnet werden. Luo et al. beschreibt drei Parametersätze, der SCD-Satz wurde mit Daten von SCD-Experimenten erstellt, der LCD-Satz entsprechend mit LCD-Daten. Der dritte Parametersatz UCS wurde für beide Farbdifferenzgrößen optimiert. Die Ausgabewerte sind in allen drei Varianten die Parameter  $J'$ ,  $a'$  und  $b'$ , die euklidisch zu Farbdifferenzen verrechnet werden.

### 2.1.4 Wahrnehmungsschwelle und überschwellige Reize

Im Folgenden sollen die Ergebnisse verschiedener visueller Experimente und Berechnungen vorgestellt werden, um einen Überblick über die analytische Beschreibung der Farbdifferenzwahrnehmung zu erhalten.

Basis für die erste gleichabständige Farbtafel der CIE, die CIE 1960 Uniform Color Scale (UCS, *uv*-Farbtafel), sind Untersuchungsergebnisse von MacAdam [19]. Experimente wurden traditionell zunächst für die *Wahrnehmungsschwelle* durchgeführt. Dabei soll die Größe eines visuellen Farbunterschiedes in verschiedene Richtungen um einen Ort im Farbraum (Farbzentrum) ermittelt werden, bis zu dem kein Unterschied mehr zum Farbzentrum selbst wahrgenommen werden kann (*unterschwelliger Reiz*).

Im Gegensatz dazu stellt ein *überschwelliger Reiz* einen sichtbaren Farbunterschied dar. Je nach Größe der Farbdifferenz unterscheidet man zwischen *kleinen Farbdifferenzen* (*small colour differences*, SCD) und *großen Farbdifferenzen* (*large colour differences*, LCD). In der Literatur werden  $\Delta E_{ab}^* < 3,5 \dots 6$  für *kleine Farbdifferenzen* und  $\Delta E_{ab}^* \approx 10$  für *große Farbdifferenzen* angegeben [14-16].

### Wahrnehmungsschwelle: MacAdam 1942

MacAdam [19] untersucht die Wahrnehmungsschwelle um 25 verschiedene Farbzentren. Sein Aufbau lässt die Versuchsperson einäugig auf ein 2° großes Testfeld blicken, das mittig in Referenz- und Testseite geteilt wird. Beide Seiten weisen während des gesamten Versuches eine konstante Leuchtdichte von 15 Millilambert (ca. 48 cd/m<sup>2</sup>) auf. Ein 42° großes Umfeld (ca. 24 cd/m<sup>2</sup>, Normlichtart C) dient zur Adaptation.

Mittels eines Drehknopfes soll die Versuchsperson die Farbe der Testseite auf die Referenzseite abgleichen. Um die nötigen Farbreize zu erzeugen, kommt eine auf Normlichtart A kalibrierte Lichtquelle und mehr als 100 täglich kalibrierte Filter zum Einsatz (Partialfilterung mit Gelatine-Stückchen). Beispielhafte Abgleichergebnisse für ein Farbzentren zeigt Abbildung 2.2.

Tabelle 2.2: Übersicht über visuelle Farbabgleichexperimente, unterschieden nach Größe der Farbdifferenz

Autoren	Veröffent-lichung	Name des Experimentes	Farb-differenz	Grundlage für	Quel-le
MacAdam	1942	MA color-matching error data	TCD	CIELUV	[19]
Newhall, Nickerson, Judd	1943	Munsell	LCD	CIELAB, CIECAM02-LCD	[22]
Brown, MacAdam	1949	BMA	TCD		[29]
Brown	1957		TCD		[30]
Wyszecki, Fielder	1971	WFCM	TCD		[31]
Wyszecki, Fielder	1972	WFCDM	SCD		[32]
MacAdam	1974	OSA	LCD	CIECAM02-LCD	[33]
Richter	1985		TCD		[34]
Luo, Rigg	1986	BFD-P		CIE94, CIEDE2000, CIECAM02-SCD	[35]
Addae-Badu	1986	BFD-Textile	LCD	CIECAM02-LCD	[36]
Berns et. al.	1991	RIT-DuPont	SCD	CIE94, CIEDE2000, CIECAM02-SCD	[37]
Kim, Nobbs	1997	Leeds	SCD	CIEDE2000, CIECAM02-SCD	[38]
Kim	1997	Leeds Grayscale	SCD		[39]
Kim	1997	Leeds Pair Comparison	SCD		[39]
Pointer, Attridge	1997		SCD, LCD	CIECAM02-LCD	[40]
Witt	1999		SCD	DIN99, CIEDE2000, CIECAM02-SCD	[41]
Guan, Luo	1999		LCD	CIECAM02-LCD	[42]
Zhu, Luo, Cui	2001		LCD	CIECAM02-LCD	[43]
Kittelmann	2010		TCD, LCD		[44]

MacAdam lässt 25 Farbzentren mit je 5...10 Filterkombinationen abgleichen. Für jede Filterkombination werden ca. 50 Wiederholungen vorgenommen. Insgesamt bedeutet das mehr als 10.000



Abgleiche. Das ist unter anderem der Grund, warum der Versuch nur mit einer Versuchsperson durchgeführt wird, Mr. Perley G. Nutting (PGN). An Vorversuchen nimmt MacAdam selbst als zweite Versuchsperson teil.

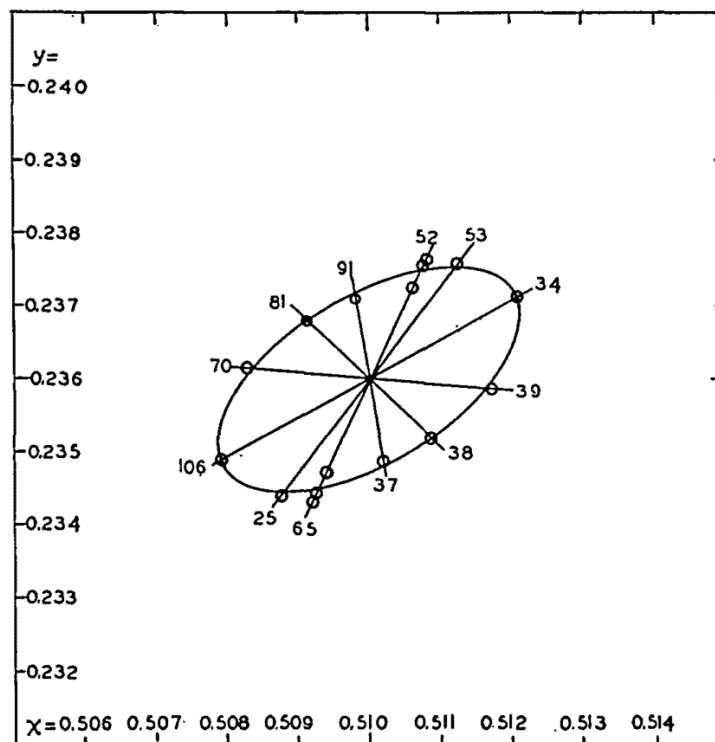


Abbildung 2.2: Darstellung von Abgleichergebnissen für 6 Filterkombinationen in der CIE 1931  $xy$ -Farbtabelle [19]

Der Versuch erweist sich als sehr ermüdend, ein Training der Versuchsperson ist notwendig. Ausgewertet wird nicht der mittlere Farbunterschied zwischen abgeglichenem Testfeld und Referenzfeld, sondern die Standardabweichung der 50 Wiederholungen. Dies wird als stabileres Maß für die Ermittlung der gesuchten Schwellwerte angesehen. Die ermittelten Farbdifferenzen (Standardabweichungen) um die Farbzentren weisen in der CIE 1931  $xy$ -Farbtabelle die Form von Ellipsen auf, Größe und Orientierung ist aber unter den 25 Farbzentren sehr unterschiedlich. Man spricht daher von SDCM-Ellipsen (standard deviation of color matching).

In nachfolgenden Untersuchungen erweitert MacAdam bzw. Brown (anfänglich Masterstudent bei MacAdam in Rochester) den Versuch um die dritte Dimension (Helligkeit) und testet auch mit mehreren Versuchspersonen [45] [30].



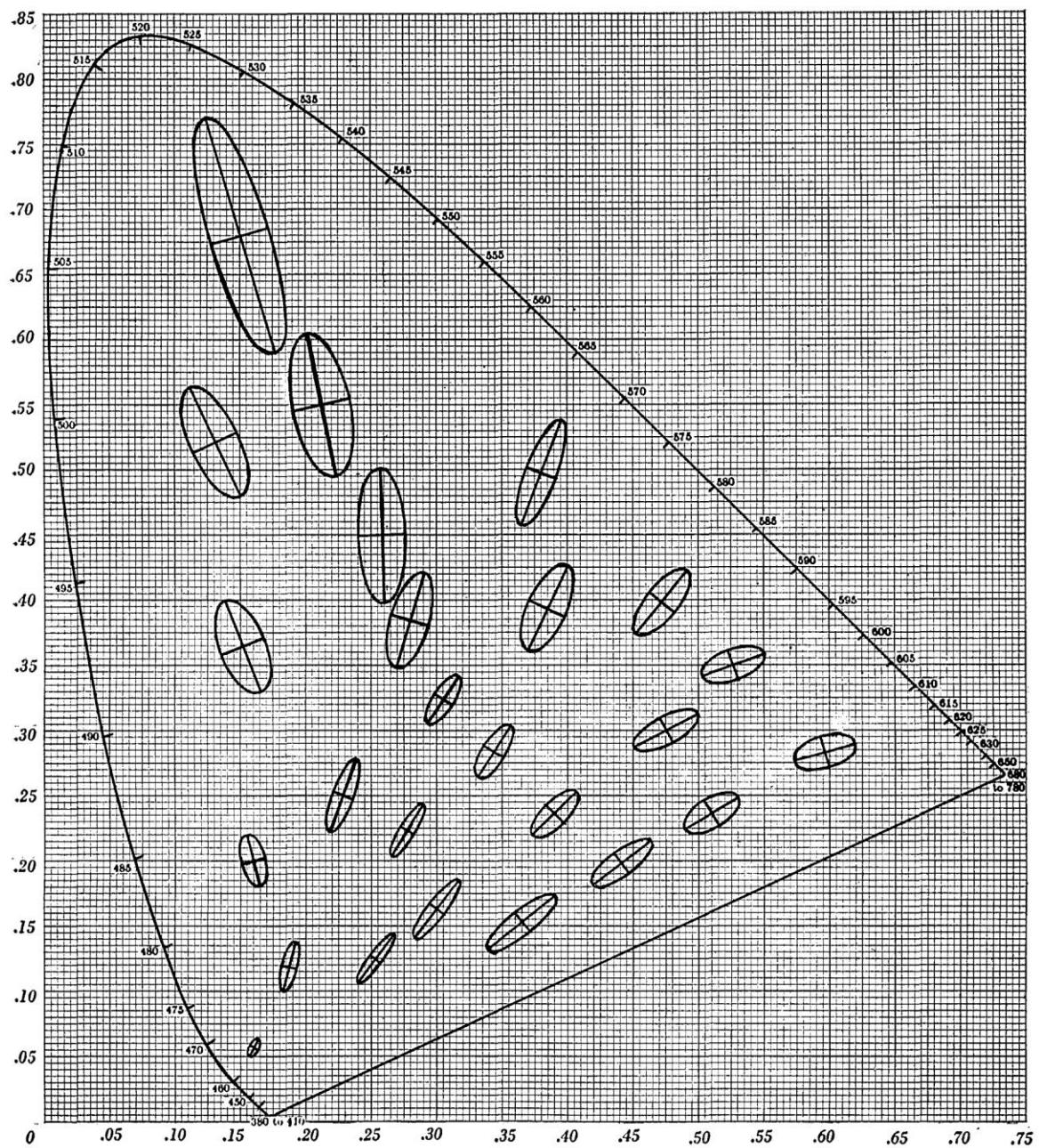


Abbildung 2.3: Wahrnehmungsschwellen nach MacAdam, dargestellt in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel, 10-fach vergrößert [19]

## Vergleich mit überschwelligen Reizen

Kuehni [46] stellt im Vergleich zwischen SDCM-Ellipsen und Berechnungen mit der Farbdifferenzformel CIE94 fest, dass sich die Größe und Orientierung der entstehenden Ellipsen für  $\Delta E = 1$  deutlich unterscheiden können.

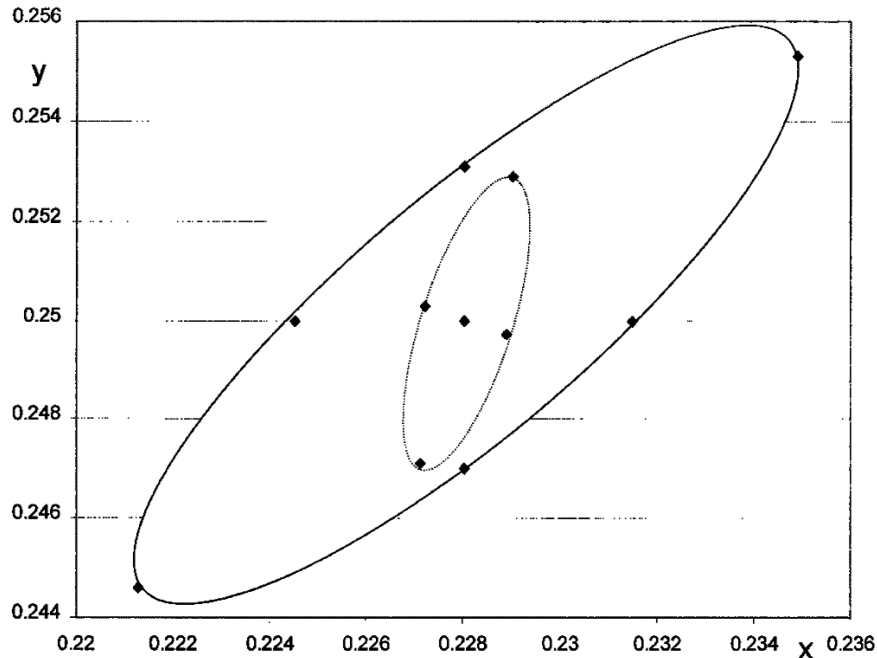


Abbildung 2.4: SDCM-Ellipse (innen) und CIE94  $\Delta E = 1$  Ellipse (außen) um ein blaues Farbzentrum [46]

CIE94 basiert auf zwei Datensätzen, die in Experimenten mit *kleinen Farbdifferenzen* ermittelt wurden [37] [47]. Eine Farbdifferenz von  $\Delta E = 1$  sollte der *Wahrnehmungsschwelle* entsprechen und es wäre zu erwarten, dass sich Ellipsen vergleichbar zu MacAdam (1942) ergeben. Dies ist aber für viele Farbzentren nicht der Fall. Entsprechend unzulässig ist es auch, zur Beurteilung *überschwelliger Reize* simple Vergrößerungen von *Schwellwert-Ellipsen* (z. B. MacAdam 1942) zu verwenden. Leider wird genau dies häufig getan (siehe Abschnitt 2.3.1). Zum gleichen Ergebnis kommen auch Wyszecki beim Vergleich von *color-matching ellipses* und *color-difference-matching ellipses* [32] sowie Witt [41].

Auch Xu [48] stellt in einem Experiment mit vier Farbdifferenzen (Schwellwert,  $\Delta E = 4$ ,  $\Delta E = 8$ ,  $\Delta E = 12$ ) fest, dass sich die Orientierung der ermittelten Toleranzellipsen ändert. Die größte Änderung wird beim Übergang von Schwellwert zu  $\Delta E = 4$  festgestellt, die weitere Erhöhung der Farbdifferenz auf  $\Delta E = 8$  und  $\Delta E = 12$  bewirkt nur noch eine kleine Veränderung der Ellipsenorientierung.

### 2.1.5 Interpersonelle Streuung

Bei vielen Experimenten zur Farbwahrnehmung stellten sich Forscher die Frage, ob verschiedene Versuchspersonen Farben in der gleichen Art und Weise wahrnehmen. Falls dem so ist, so wäre eine

Mittelwertbildung über die Ergebnisse aller Versuchspersonen problemlos möglich. Die Ergebnisse einer weiteren Versuchsperson hätten den gleichen Stellenwert wie weitere Wiederholungen bereits getesteter Personen. Nachdem MacAdam in seiner Publikation von 1942 [19] nur die Farbabgleiche mit einer Versuchsperson beschrieben hat, gehen nachfolgende Veröffentlichungen auf interpersonelle Unterschiede in den Abgleichergebnissen ein.

Wyszecki und Fielder [31] führen Farbabgleiche mit drei Versuchspersonen durch und berechnen Schwellwertellipsen vergleichbar zu MacAdam [19], Abbildung 2.5 zeigt die Ergebnisse. Die Abgleiche für ein Farbzentrum werden dabei in jeder Versuchs-Session 30-fach wiederholt und zu einer Ellipse verrechnet. Im Abstand von mehreren Wochen werden wiederholte Sessions durchgeführt und weitere Ellipsen berechnet.

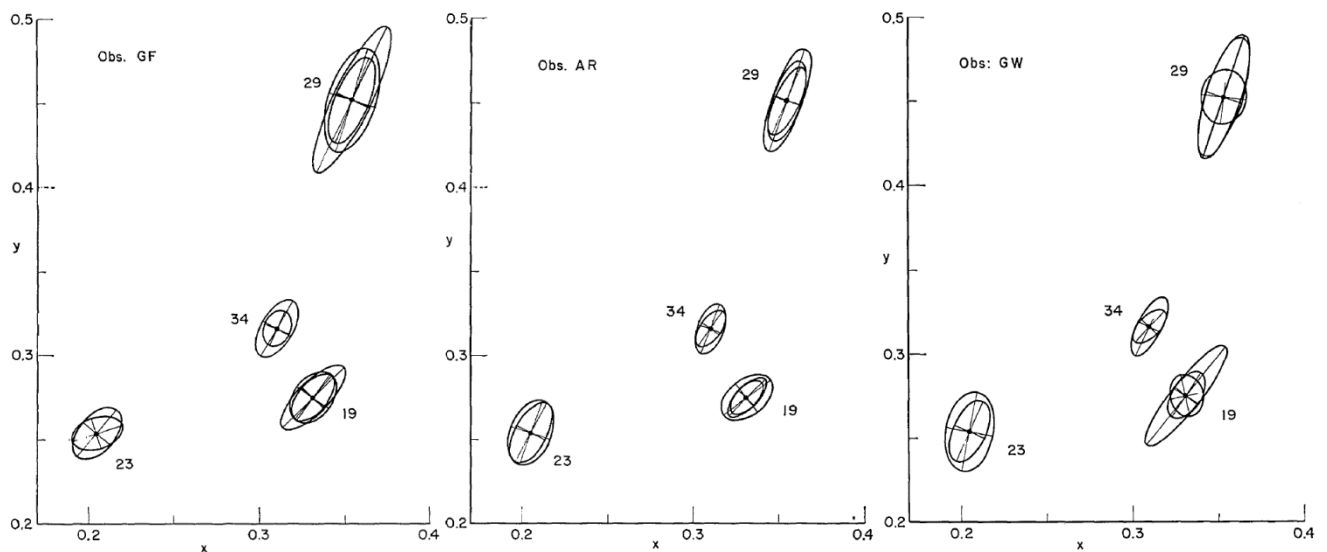


Abbildung 2.5: Farbabgleichellipsen für drei Versuchspersonen (links: GF; Mitte: AR; rechts: GW) für den wiederholten Abgleich von vier Farbzentren (19, 23, 29 und 34), nach Wyszecki et. al. [31]

Es zeigt sich, dass die Wiederholbarkeit für eine Versuchsperson (*intra*-personelle Streuung) teilweise schlecht ausgeprägt ist: Versuchsperson GW (Abbildung 2.5 rechts) zeigt bei der Wiederholung der Farbzentren 19 und 29 deutliche Abweichungen in der Form und Größe der Ellipsen. In etwa gleicher Größenordnung zeigen sich die Abweichungen zwischen verschiedenen Versuchspersonen (*inter*-personelle Streuung). Die Autoren raten von einer Mittelwertbildung über verschiedene Versuchspersonen ab.

In einem Experiment [49] mit überschwelligen Reizen stellen Wyszecki und Fielder fest, dass die wiederholten Abgleiche einer Versuchsperson innerhalb einer Session normalverteilt sind. Der Vergleich verschiedener Versuchspersonen zeigt aber deutliche Unterschiede in Orientierung und Größe der berechneten Toleranzellipsen.

Alfvén und Fairchild [50] stellen in ihrem Experiment interpersonelle Farbabgleichunsicherheiten von etwa doppelter Größe der intrapersonellen Unsicherheiten fest (siehe Abbildung 2.6). Die Versuchspersonen sollten dabei ein 2,9°-Testfeld auf einem CRT-Monitor auf visuelle Gleichheit zu einer gedruckten Körperfarbe abgleichen.



Ebenso stellt Xu et. al. [48] fest, dass die Streuungen unter vier Versuchspersonen sowohl beim Abgleich von Schwellwertreizen als auch von überschwelligen Reizen nicht zu vernachlässigen ist.

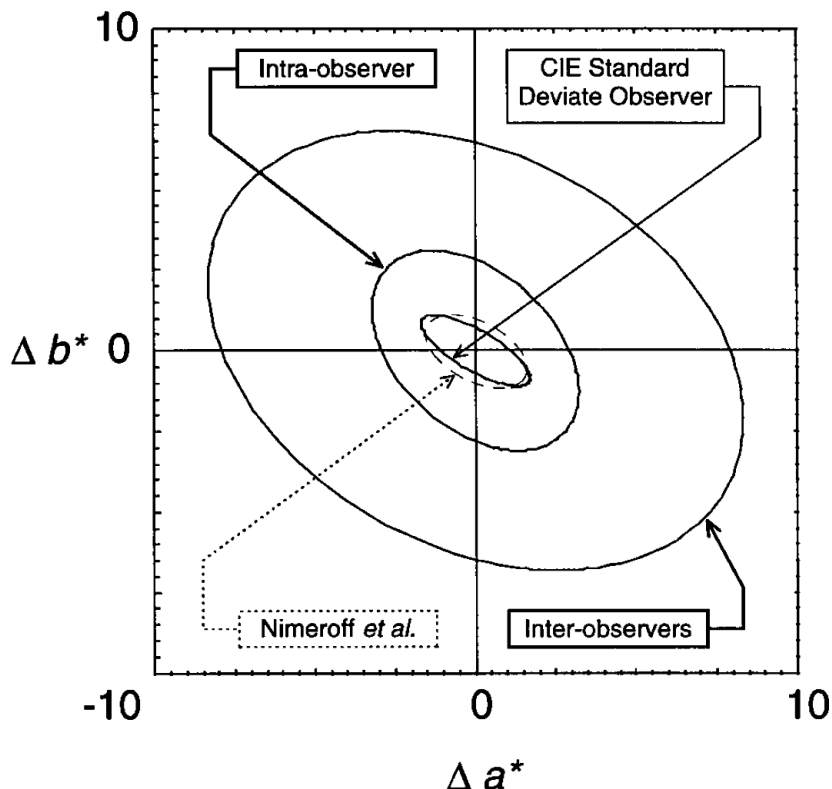


Abbildung 2.6: Intra- und interpersonelle Abgleichunsicherheit (95% Konfidenz) in der CIELAB-Farbebene nach Alfvin und Fairchild [50]

Oicherman et. al. [51] beobachtet dass die interpersonellen Streuungen in derselben Größenordnung angesiedelt sind wie die intrapersonellen Streuungen. Daraus wird geschlussfolgert, dass individuell abweichende spektrale Empfindlichkeitsfunktionen (colour-matching functions) nicht die alleinige Erklärung für auftretende Streuungen sein können. Vielmehr werden andere Mechanismen der Farbunterscheidung vorgeschlagen, die durch Wahl geeigneter Parameter in Farbdifferenzformeln nachgebildet werden können.

Im Experiment von Urban et. al. [52] bewerten Versuchspersonen kleine Farbunterschiede (leicht oberhalb der Wahrnehmungsschwelle) nach Art des RIT-DuPont-Experimentes [37]. Im Vergleich zu RIT-DuPont stellen die Autoren eine größere interpersonelle Streuung fest, die sich mit dem geringeren Leuchtdichteniveau erklären lässt. Außerdem wurde das Experiment mit spektral schmalbandigeren Reizen durchgeführt, was über individuelle Unterschiede in den spektralen Empfindlichkeitsfunktionen zu größeren Unterschieden in der individuellen Farbdifferenzwahrnehmung führt.

Frohnappfel et. al. [53] untersucht die individuellen Abweichungen in der Farbempfindung rechnerisch mit Hilfe der individuellen Daten der Farbabgleichexperimente von Stiles & Burch [54] für 20 Probanden.

---

Testfarben aus dem MacBeth Color Checker Chart und dem CQS-Index [55] werden mit verschiedenen Lichtquellen beleuchtet und mit den individuellen Spektralwertfunktionen der 20 Probanden bewertet. Anschließend werden Farbdifferenzen unter den Probanden berechnet. Je nach Testfarbe und Lichtquelle können zwischen mittlerem Beobachter und einzelnen Probanden Farbdifferenzen  $\Delta E_{ab}^*$  von 8 bis 10 auftreten. Die maximale Differenz zwischen zwei maximal entfernten Probanden liegt bei  $\Delta E_{ab}^* = 17$ . Diese Werte liegen in der Größenordnung *großer Farbdifferenzen* und sind keinesfalls zu ignorieren.

Die maximale Farbdifferenz unter den Probanden ist vom Buntton abhängig: Blaue und gelbe Testfarben weisen eine größere Streuung auf als grüne und rote. Auch scheinen warmweiße RGB-LED-Mischungen die größten interpersonellen Streuungen zu bewirken, obwohl festgestellt wird dass auch eine weiße High-CRI-LED mit sehr gefülltem Spektrum große Streuungen aufweist.

Einige Autoren versuchen mit analytischen Modellen mit Parametern für Adaptation und individuelle Wahrnehmungsbesonderheiten die Ergebnisse visueller Schwellwertabgleiche zu beschreiben [56, 57].

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Bei Farbabgleichexperimenten sind die interpersonellen Streuungen nicht zu vernachlässigen. Eine einfache Mittelwertbildung unter den Ergebnissen verschiedener Versuchspersonen ist problematisch.
- Andererseits besteht auch ein Problem mit der niederen Farbmeterik (CIE 1931): Ein visueller Abgleich mit schmalbandigen Lichtquellen stimmt oft nicht mit dem messtechnischen Abgleich überein [58, 59]. Diese These wird auch durch die Ergebnisse von Frohnapfel et. al. [53] gestützt.

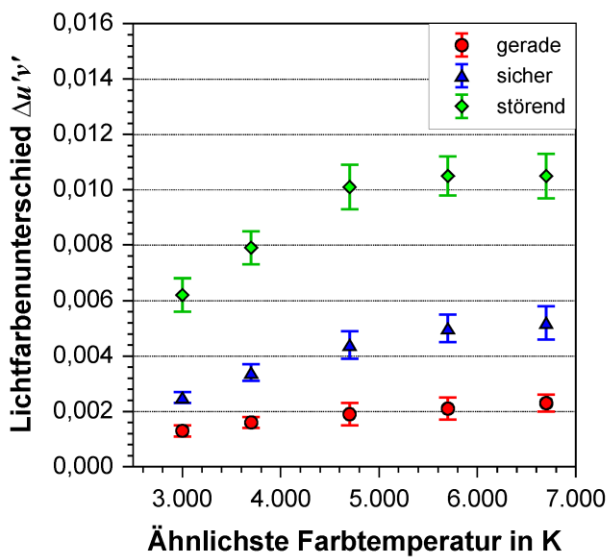
### 2.1.6 Kategorisierte Beschreibung

Bieske verwendet in ihren Untersuchungen [60, 61] Farbzentren entlang des Planckschen Kurvenzuges (3000 K ... 6700 K) und variiert den Reiz sowohl in der Größenordnung der Wahrnehmungsschwelle als auch überschwellig. Die Probanden sollen die präsentierten Reizpaare einer Kategorie zuordnen, zur Wahl stehen:

- nicht erkennbar
- gerade erkannt
- sicher gesehen
- störend empfunden

Bieske verwendet keine Kategoriebegriffe wie „akzeptabel“, „noch akzeptiert“ oder „inakzeptabel“. Die Probanden blicken in eine weiß ausgekleidete Untersuchungsbox, der Reiz wird nimmt dabei nahezu das gesamte Gesichtsfeld ein. Die zwei zu vergleichenden Reize werden zeitlich nacheinander präsentiert, nicht simultan.

### Variation entlang des Planckschen Kurvenzuges



### Variation entlang der Juddschen Geraden

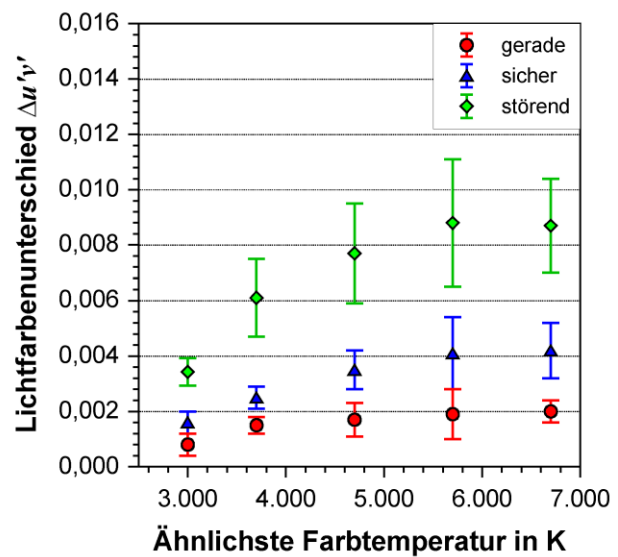


Abbildung 2.7: Wahrnehmbarkeit von sprunghaften Farbveränderungen entlang des Planckschen Kurvenzuges (links) und entlang der Juddschen Geraden (rechts) [61]

Aus Abbildung 2.7 können die Farbunterschiede (Mittelwerte und Konfidenzintervalle) für jede Kategorie abgelesen werden. Da sich die Konfidenzintervalle für die Ergebnisse „entlang des Planckschen Kurvenzuges“ und „entlang der Juddschen Geraden“ (linkes bzw. rechtes Diagramm in Abbildung 2.7) überlappen, kann ein gemeinsamer Wert abgelesen werden.

Tabelle 2.3: Farbabweichungen für die Kategorien nach Bieske

Kategorie	3000 K	$\Delta u'v'$ 4700 K	6700 K
gerade erkannt	0,001...0,0015	0,002	0,002
sicher gesehen	0,0015...0,0025	0,004	0,005
störend empfunden	0,0035...0,0065	0,008...0,010	0,010

Tabelle 2.4: Farbdifferenzen (CIELAB und CIEDE2000) und deren Bewertung nach Kraushaar [62]

$\Delta E_{ab}^*$	$\Delta E_{00}^*$	Empfindung bzw. Farbeindruck
0...1	<0,5	normalerweise nicht sichtbar
1...2	0,5...1	sehr kleine Abweichung, nur von einem geschulten Auge erkennbar
2...3,5	1...2	mittlere Abweichung, auch von einem ungeschulten Auge erkennbar
3,5...5	2...4	deutliche Abweichung
>6	>4	starke Abweichung

Die Erfahrungen von Kraushaar [62] in der grafischen Industrie zur Größe und Benennung von Farbdifferenzkategorien fasst Tabelle 2.4 zusammen. In diesem Industriezweig wird traditionell mit CIELAB gearbeitet, es finden aber auch langsam neue Farbdifferenzformeln wie CIEDE2000 Eingang.

### 2.1.7 Geeigneter Farbraum

Zur messtechnischen und farbmtrischen Beschreibung der Farberscheinung und der Farbdifferenzwahrnehmung wird – quasi als Fundament – ein Farbraum benötigt, der in möglichst allen Bereichen visuelle Gleichabständigkeit aufweist. Damit wird es ermöglicht, einfache euklidische Abstände statt komplexer Farbdifferenzformeln zur Beschreibung visueller Farbunterschiede zu verwenden – siehe dazu auch Kapitel 2.1 „Beschreibung von Farbdifferenzen“ ab Seite 4.

Welcher Farbraum aber weist diese visuelle Gleichabständigkeit auf? Luo et. al. [27] vergleichen dazu verschiedene Farbräume und Farbdifferenzformeln (unter anderem CIELAB, DIN99, CMC, CIE94, CIEDE2000, CIECAM02 inkl. -LCD, -SCD und -UCS-Erweiterungen) auf die Fähigkeit, visuelle Versuchsergebnisse vorherzusagen. Hat man es mit großen Farbdifferenzen zu tun, so liefert CIECAM02-LCD die besten Ergebnisse, dicht gefolgt von CIECAM02-UCS. Für kleine Farbdifferenzen liegen CIECAM02-SCD, CIECAM02-UCS, CIEDE2000, DIN99 gleichauf. Über alle visuellen Testdaten gesehen liefert CIECAM02-UCS die besten Ergebnisse.

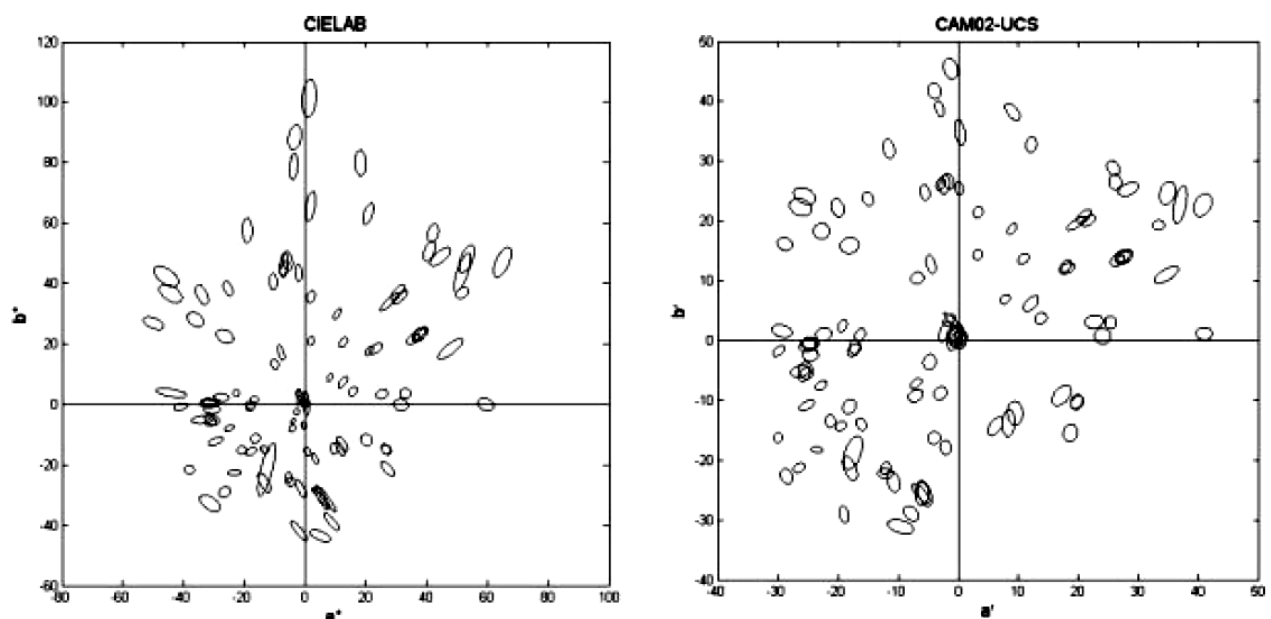


Abbildung 2.8: Visuelle Testdaten (Daylight, SCD und LCD) in der CIELAB- (links) und CIECAM02-UCS-Farbtabelle (rechts) [27]

Abbildung 2.8 zeigt einen kombinierten Datensatz visueller Testergebnisse, zusammengesetzt aus allen Versuchsdaten, die zur Erstellung von CIECAM02-SCD und CIECAM02-LCD verwendet wurden (siehe auch Tabelle 2.2 auf Seite 9). Diese Versuche wurden unter der von der CIE empfohlenen Beleuchtungsart Daylight (6500 K) durchgeführt.

Im Gegensatz dazu sind in Abbildung 2.9 visuelle Daten eines Versuches unter Normlichtart A (2856 K) dargestellt. In einem idealen gleichabständigen Farbraum würden die visuellen Ergebnisse an jedem Ort gleich große Kugeln bilden (bzw. Kreise in der Projektion in die zweidimensionale Farbtabelle). Es ist zu erkennen, dass CIECAM02-UCS diesem Ideal näher kommt als CIELAB, dennoch kann auch CIECAM02-UCS nicht als perfekt gleichabständiger Farbraum gelten.

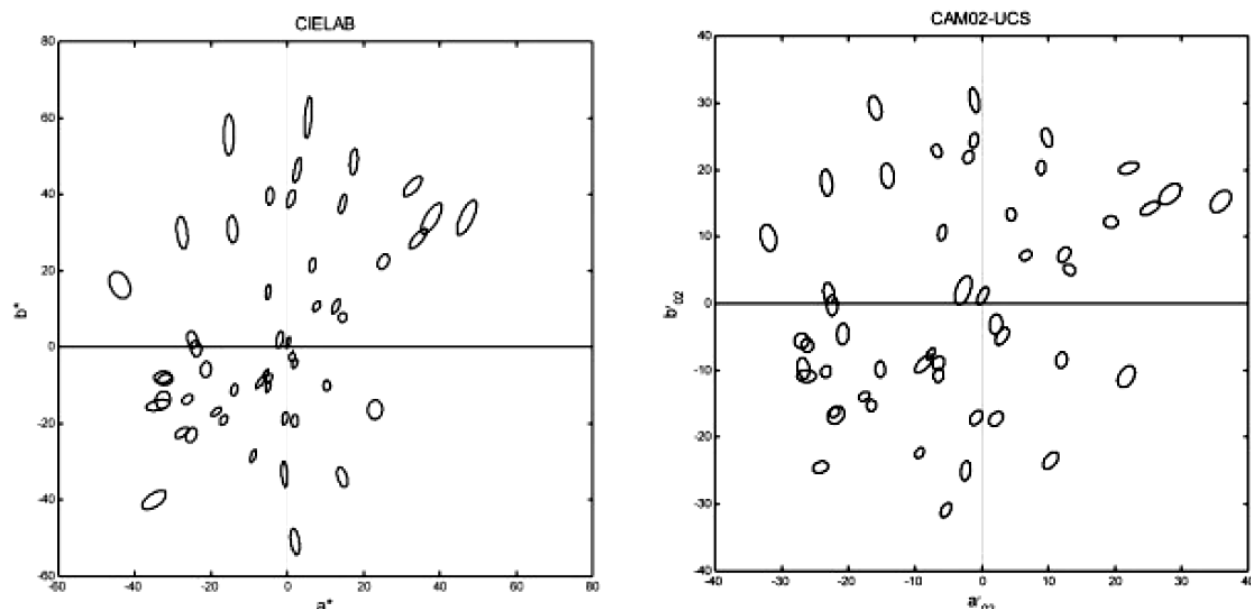


Abbildung 2.9: Visuelle Testdaten (Normlichtart A, SCD) in der CIELAB- (links) und CIECAM02-UCS-Farbebene (rechts) [27]

Im Gegensatz zu Farbdifferenzformeln basiert ein Farbwahrnehmungsmodell wie CIECAM02 auf einem Farbraum und kann damit auch weiterführende Fragen, wie etwa die Gleichabständigkeit unter verschiedenen Farbreizen, modellieren. Außerdem können Änderungen in den Betrachtungsbedingungen (Umfeldleuchtdichte/Adaptationszustand) berücksichtigt werden, so wurde CIECAM02 auch erfolgreich unter mesopischen Bedingungen getestet [63].

Weitere Auswertungen visueller Farbabgleichversuche stützen die Aussage, dass CIECAM02-basierte Farbräume am besten zur Vorhersage visueller Farbwahrnehmungen geeignet sind [14, 64, 65]. Für den Einsatz zur Farbwiedergabe-Bewertung steht mit CIECAM02-UCS ein universeller Farbraum zur Verfügung, der im Bereich kleiner und großer Farbunterschiede gute Ergebnisse zeigt [66, 67]. Für die Anwendung im LED-Binning dagegen bilden kleine Farbunterschiede den Schwerpunkt, hier bieten sich CIECAM02-SCD oder CIECAM02-UCS an.



---

## 2.2 Entwicklung der Farbwiedergabe-Definition

---

In der CIE wurden zwei unterschiedliche Ansätze zur Charakterisierung der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lichtquelle untersucht [68, 69]:

- Spektralbandmethode
- Methode der Farbverschiebung

Erstere basiert auf dem „Ausschneiden“ verschiedener Bereiche aus dem Spektrum der Lichtquelle, realisiert durch Bandpassfilterung [70]. Dabei werden die Strahldichten der Testlichtquelle in den 8 Spektralbändern mit denen der Referenzlichtquelle verglichen [71, 72]. Letztere bewertet die Verschiebung der Farbörter von Testfarben, die mit Referenz- und Testlichtart beleuchtet werden.

Tabelle 2.5: Spektralbänder der CIE-Spektralbandmethode

Spektralband	untere Grenze [nm]	obere Grenze [nm]	spektrale Breite [nm]
1	380	420	40
2	420	440	20
3	440	460	20
4	460	510	50
5	510	560	50
6	560	610	50
7	610	660	50
8	660	760	100

Ouweltjes [73] untersucht beide Methoden sehr sorgfältig und kommt zu dem Schluss, dass die Spektralbandmethode eine relativ schlechte Übereinstimmung mit visuellen Testergebnissen liefert, weil dabei die spektralen Zapfenempfindlichkeiten des menschlichen Auges nicht berücksichtigt werden. Weder die Änderung der Anzahl der Bänder, der Lage der Bandgrenzen oder die Gewichtung der einzelnen Bänder bringt eine Verbesserung. Die Methode der Farbverschiebung dagegen liefert schon mit acht Testfarben bessere Ergebnisse [73].

Münch [74] und Nickerson [75] kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Methode der Farbverschiebung mit acht Testfarben gute Ergebnisse liefert – vorausgesetzt, die acht Farben werden gleichmäßig im Farbkreis verteilt. Vor diesem Hintergrund wählt die CIE 1961 die Methode der Farbverschiebung als grundlegendes Verfahren. 1965 schließlich wird durch die CIE mit der Publikation No. 13 [20] ein Verfahren zur Messung und Kennzeichnung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen verabschiedet.

---

Bereits bei der Verabschiedung des CIE-Farbwiedergabeindex 1965 ist den Beteiligten bewusst, dass es sich um eine vorläufige Lösung handelt. Bekannte Probleme betreffen vor allem die Farbumstimmung (chromatische Adaptation), deren mathematische Beschreibung nicht ausreichend gelöst werden kann. Als Ausweg wird nicht nur eine Referenzlichtart gewählt, sondern eine Vielzahl. Eine spätere Revision dieser Empfehlung wird nicht ausgeschlossen [20].

### 2.2.1 CIE-Farbwiedergabeindex 1965

Nach der CIE-Publikation Nr. 13 [20] wird der Farbwiedergabeindex in den folgenden Schritten berechnet.

#### Bestimmung der Referenzlichtart

Zunächst muss die Referenzlichtart bestimmt werden. Sie wird für jede zu vermessende Lichtquelle (Testlichtart) separat bestimmt. Für Lichtquellen mit ähnlichster Farbtemperatur unterhalb 5000 K entspricht die Referenzlichtart einem Planckschen Strahler gleicher Farbtemperatur. Für ähnlichste Farbtemperaturen von 5000 K oder darüber wird eine Tageslichtart gewählt. Dabei muss ein Maximalabstand beider Farbörter in der 1960 uv-Farbtabelle von  $\Delta C = 5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{deg}$  eingehalten werden. Zur Berechnung dient Formel 2.3. Dabei steht der Index  $k$  für die Testlichtart und Index  $r$  für die Referenzlichtart.

$$\Delta C = \sqrt{(u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2}$$

Formel 2.3

#### Testfarben

Für die Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex  $R_a$  werden acht Testfarben (Test Colour Samples, TCS) benutzt. Sie sind in einem Farbtonkreis angeordnet und weisen eine mittlere Sättigung auf (siehe Abbildung 2.11).



Abbildung 2.10: Testfarben zur Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex  $R_a$  1965 [20]

Tabelle 2.6: Munsell-Werte der Testfarben

Nr.	Beschreibung	Munsell-Wert [76]
1	Altrosa	7,5 R 6/4
2	Senfgelb	5 Y 6/4
3	Gelbgrün	5 GY 6/8
4	Grün	2,5 G 6/6
5	Hellblau	10 BG 6/4
6	Himmelblau	6 5 PB 6/8
7	Asterviolett	2,5 PB 6/8
8	Fliederviolett	10 PB 6/8
9	Rot	4,5 R 4/13
10	Gelbgrün	5 Y 8/10
11	Grün	4,5 G 5/8
12	Blau	3 PB 3/11
13	Hautfarbe	5 YR 8/14
14	Blattgrün	5 GY 4/4

Die Remissionsgrade aller acht Farben weisen etwa gleiches Niveau auf. Das ist eine positive Voraussetzung für die Berechnung eines allgemeinen Farbwiedergabeindex. Tabelle 2.6 zeigt alle definierten Testfarben mit ihren Munsell-Notationen [76].

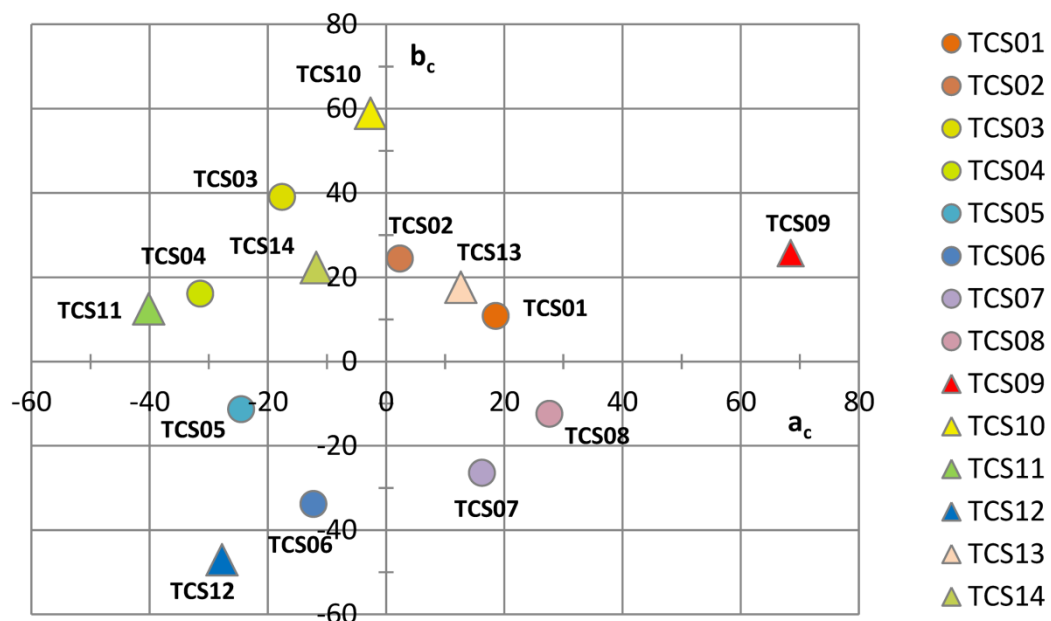


Abbildung 2.11: CRI-Testfarben unter D65-Beleuchtung in der CIECAM02-Farbebene

Abbildung 2.12 zeigt die spektralen Reflexionsgrade der ersten acht Testfarben. Erkennbar ist, dass sowohl Farben mit relativ geringer Sättigung (z. B. TCS02) – d. h. ohne steil ansteigende Flanken im Spektrum – als auch Farben mit höherer Sättigung (mit steilen Flanken, z. B. TCS08) vertreten sind.

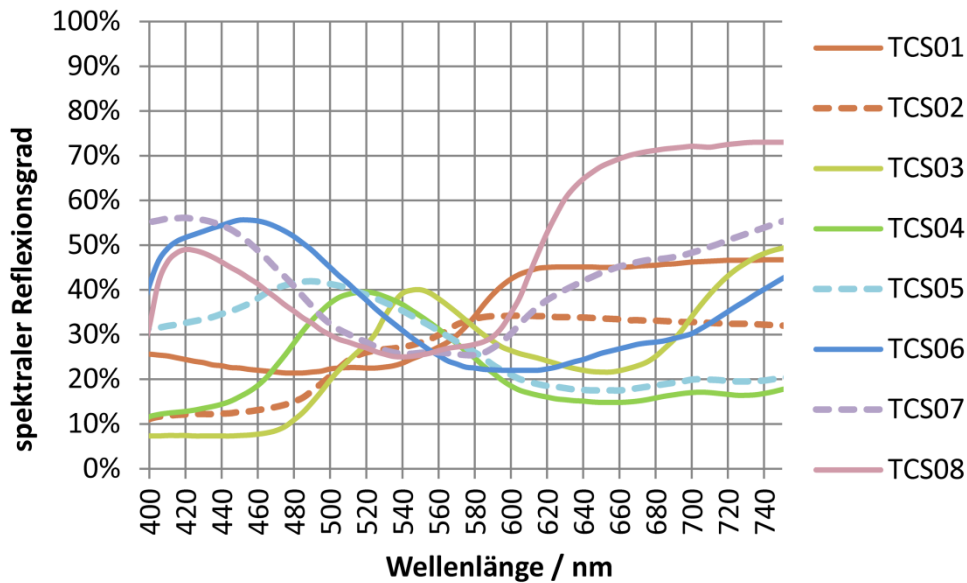


Abbildung 2.12: Spektraler Reflexionsgrad der Testfarben (TCS) 1-8 für die Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex

Entsprechend klein oder groß ist auch deren Abstand zum Nullpunkt in der Farbebene (siehe Abbildung 2.11). Bei der Beleuchtung mit spektral schmalbandigen Lichtquellen kann dies zu Artefakten führen, siehe auch Abschnitt 2.2.7 „Kritik am CIE-Farbwiedergabeindex“.

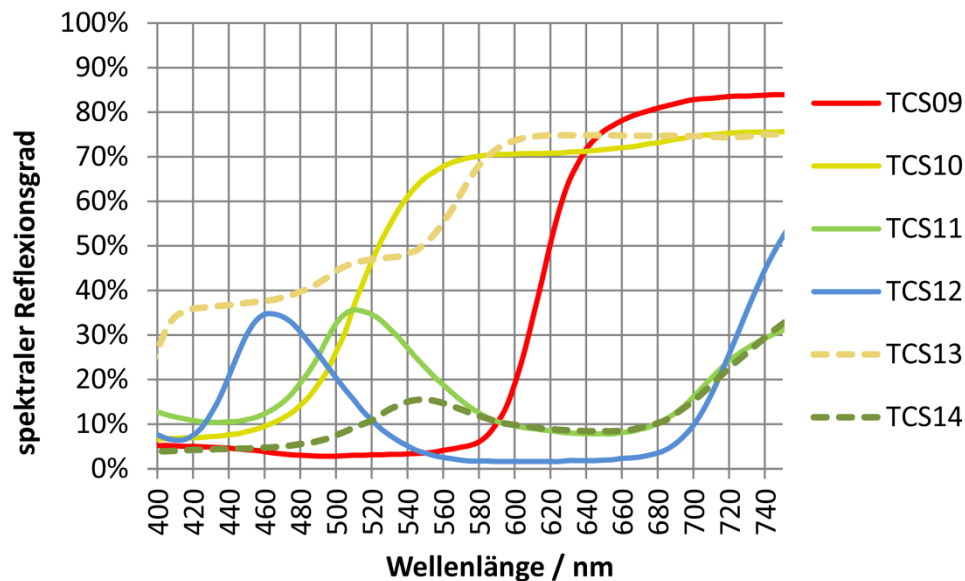


Abbildung 2.13: Spektraler Reflexionsgrad der Testfarben (TCS) 9-14 für die Berechnung der speziellen Farbwiedergabeindizes

Wünschenswert ist außerdem eine möglichst kleine lineare Abhängigkeit der Testfarbenspektren untereinander. Damit würde jede Testfarbe neue Informationen zum Farbwiedergabeindex beitragen (keine Redundanz). Beim Blick auf die spektralen Verläufe scheint das nicht immer optimal der Fall zu sein (z. B. TCS01 und TCS02; TCS07 und TCS08).

---

Ein Nichtoptimum in diesem Punkt ermöglicht das Design von Lichtquellenspektren mit hohem Indexwert trotz schlechter visueller Bewertung [67].

Zusätzlich werden ergänzende Testfarben definiert, die vier gesättigte Farben (TCS09...TCS12) und zwei spezielle Farben (TCS13 Hautton und TCS14 Blattgrün) enthalten. Besonders die beiden Testfarben am Rand des sichtbaren Spektrums – TCS09 Rot und TCS12 Blau – erweisen sich als wertvolles Hilfsmittel bei der Beurteilung von Lichtquellenspektren. Bei der Optimierung von Lichtquellenspektren auf Energieeffizienz ( $\frac{lm}{W}$ ) werden oft die Randbereiche des sichtbaren Spektrums vernachlässigt, da sie kaum zu einer  $V(\lambda)$ -bewerteten Hellempfindung beitragen.

## Berechnung der Farbdifferenzen

In diesem Schritt werden die Normfarbwerte aller Testfarben, jeweils unter Beleuchtung durch die Referenz- und Testlichtart, zu Farbdifferenzen verrechnet. Dazu müssen alle Normfarbwerte  $XYZ$  der Testfarben vermessen werden. Alternativ kann auch nur die spektrale Verteilung der Testlichtart vermessen werden, die Bestimmung des zugeordneten Referenzlichtspektrums und die Verrechnung mit den Remissionspektren der Testfarben kann im Rechner erfolgen. Mit Hilfe der folgenden Formeln werden aus den Normfarbwerten  $XYZ$  die Koordinaten  $u$  und  $v$  bestimmt.

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad \text{Formel 2.4}$$

$$v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad \text{Formel 2.5}$$

Wie schon erwähnt kann die Farbumstimmung in der 1965er Version des CRI empfindungsgemäß nur recht ungenau berechnet werden. Korrekturfaktoren werden eingeführt, diese werden entsprechend Formel 2.6 und Formel 2.7 berechnet. Der Index  $i$  steht dabei für die jeweilige Testfarbe (1...14), die Indices  $r$  und  $k$  für die Referenz- bzw. Testlichtart.

$$u'_{k,i} = u_{k,i} + (u_r - u_k) \quad \text{Formel 2.6}$$

$$v'_{k,i} = v_{k,i} + (v_r - v_k) \quad \text{Formel 2.7}$$

Die Bezeichnungen  $u'$  bzw.  $v'$  haben dabei nichts mit der 1976 eingeführten  $u'v'$ -Farbtafel zu tun, sondern bezeichnen die modifizierten Koordinaten nach der Farbumstimmung.

Der euklidische Abstand zwischen den resultierenden Farbörtern unter Referenz- und Testlichtart wird in der  $uv$ -Farbtafel berechnet:

$$\Delta E_i = 800 \sqrt{(u_{r,i} - u'_{k,i})^2 + (v_{r,i} - v'_{k,i})^2} \quad \text{Formel 2.8}$$

---

## Berechnung des Indexwertes

Nachdem alle die Farbdifferenzen für alle Testfarben bekannt sind, kann der resultierende Farbwiedergabeindex  $R$  berechnet werden. Im ersten Schritt werden die einzelnen Farbdifferenzen in Einzel-Indexwerte  $R_i$  umgerechnet.

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad \text{Formel 2.9}$$

Abschließend kann der allgemeine Farbwiedergabeindex  $R_a$  berechnet werden. Hier werden die speziellen Indices für die Testfarben  $i = 1 \dots 8$  zusammengefasst. Die Testfarben  $i = 9 \dots 14$  gehen nicht in die Berechnung des  $R_a$  ein.

$$R_a = 100 - 4,6 \cdot \overline{\Delta E_i} \quad \text{Formel 2.10}$$

Der Faktor von 4,6 wurde willkürlich gewählt. Einer damals handelsüblichen Leuchtstofflampe wurde der Wert  $R_a = 50$  zugewiesen. Der Farbwiedergabeindex  $R_a$  kann ein Maximalwert von 100 erhalten. In diesem Fall entstehen bei keiner der 8 Testfarben Farbunterschiede zwischen Test- und Referenzlichtart. Nach unten ist keine Grenze definiert, der Indexwert kann also negative Werte annehmen.

### 2.2.2 CIE-Farbwiedergabeindex 1974/1995

1974 wird eine aktualisierte Version des CIE-Farbwiedergabeindex veröffentlicht, einige Details in der Berechnung werden verändert. 1995 wird eine editorisch veränderte Version veröffentlicht, die zu Grunde liegenden Berechnungsvorschriften bleiben aber unverändert. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in [2]. Im Folgenden sollen die 1974er Änderungen gegenüber der Vorgängerversion [20] von 1965 beschrieben werden. Sie betreffen vor allem die Beschreibung der Farbumstimmung und den zu Grunde liegenden Farbraum.

### Farbumstimmung und Farbunterschied von Referenz- und Testlichtart

Die Beschreibung der Farbumstimmung wird verbessert. Damit wird es auch möglich, den maximal erlaubten Abstand von Referenz- und Testlichtart in der 1960  $uv$ -Farbtafel auf  $\Delta C = 5,4 \cdot 10^{-3} \approx 15 \cdot 10^{-6} \frac{1}{deg}$  zu verdreifachen. Die sonstige Bestimmungsvorschrift für die Referenzlichtart bleibt unverändert. Bei der Angabe eines  $R_a$ -Wertes soll die verwendete Bezugslichtart in Klammern mit angegeben werden. Im Einzelnen sehen die Formeln zur Farbumstimmung folgendermaßen aus:

$$c = \frac{1}{v} (4 - u - 10v) \quad \text{Formel 2.11}$$

$$d = \frac{1}{v} (1,708v + 0,404 - 1,481u) \quad \text{Formel 2.12}$$

$$u'_{k,i} = \frac{10,872 + 0,404 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}{16,518 + 1,481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad \text{Formel 2.13}$$

$$v'_{k,i} = \frac{5,52}{16,518 + 1,481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad \text{Formel 2.14}$$

Dabei sind  $u'_{k,i}$  und  $v'_{k,i}$  die Koordinaten einer Testfarbe  $i$  unter der zu bestimmenden Testlichtart  $k$  in der 1960  $uv$ -Farbtafel, nicht zu verwechseln mit den Koordinaten  $u'$  und  $v'$  der 1976  $u'v'$ -Farbtafel.

## Berechnung der Farbdifferenzen

Anschließend wird im 1964  $U^*V^*W^*$ -Farbraum weiter gerechnet statt bisher in der 1960  $uv$ -Farbtafel.

$$W_{r,i}^* = 25 \cdot \sqrt[3]{Y_{r,i}} - 17 \quad \text{Formel 2.15}$$

$$U_{r,i}^* = 13 \cdot W_{r,i}^* \cdot (u_{r,i} - u_r) \quad \text{Formel 2.16}$$

$$V_{r,i}^* = 13 \cdot W_{r,i}^* \cdot (v_{r,i} - v_r) \quad \text{Formel 2.17}$$

$$W_{k,i}^* = 25 \cdot \sqrt[3]{Y_{k,i}} - 17 \quad \text{Formel 2.18}$$

$$U_{k,i}^* = 13 \cdot W_{k,i}^* \cdot (u'_{k,i} - u'_k) \quad \text{Formel 2.19}$$

$$V_{k,i}^* = 13 \cdot W_{k,i}^* \cdot (v'_{k,i} - v'_k) \quad \text{Formel 2.20}$$

Entsprechend werden auch die resultierenden Farbdifferenzen in diesem Farbraum ermittelt. Der euklidische Abstand über die Abstandsquadrate der Einzelwerte wird ermittelt:

$$\Delta E_i = \sqrt{(W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2 + (U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2} \quad \text{Formel 2.21}$$

Die Berechnung der speziellen Farbwiedergabeindices  $R_i$  erfolgt unverändert nach Formel 2.9 während der allgemeine Farbwiedergabeindex  $R_a$  als einfache Mittelwertbildung formuliert wird:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad \text{Formel 2.22}$$

### 2.2.3 Verbesserungsvorschlag CRI 1996a

1991 wird von der CIE ein Technisches Komitee TC 1-33 gegründet, das das Berechnungsverfahren für den Farbwiedergabeindex überarbeiten soll. Dieses Komitee scheitert an der Ablehnung der Industrie [77]. Sie fordert fundierte Erkenntnisse, die eine veränderte Zuordnung der Indexwerte zu vorhandenen Lichtquellen rechtfertigen würden. Eine solche veränderte Zuordnung kann weitreichende Verschiebungen am Lichtquellenmarkt bedeuten.

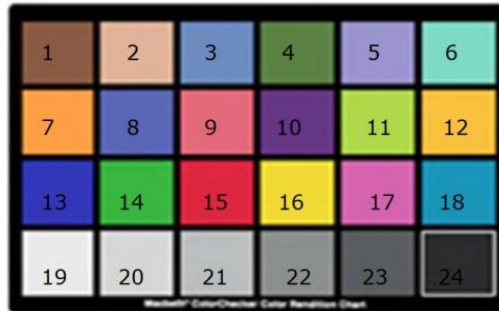


Abbildung 2.14: MacBeth Color Checker Chart (MBCCC)

Obwohl das Komitee keine neue Definition der Farbwiedergabeindex-Berechnung hervorbringt – und damit die bisherige 1974/1995-Version in Kraft bleibt – werden die folgenden Verbesserungen vorgeschlagen:

- Die Original-Testfarben sind nicht mehr am Markt erhältlich, daher wird die Verwendung der stärker gesättigten Testfarben des MacBeth ColorCheckerCharts (MBCCC) vorgeschlagen.
- Die Berechnung der Farbunterschiede sollte im gleichabständigeren Farbraum CIELAB durchgeführt werden.
- Die Berechnung der Farbumstimmung sollte auf Basis einer chromatischen Adaptationsformel (CIE94) geschehen.
- Damit einhergehend sollte die Anzahl der Referenzlichtarten auf sechs feste Lichtarten reduziert werden: Tageslicht D50 und D65 sowie Planck'sche Strahler der Farbtemperaturen 4200 K, 3450 K, 2950 K und 2700 K.

Aufgrund der akuten Nachfrage nach der Anwendbarkeit des Farbwiedergabeindex für LEDs beschließt die CIE die Gründung des Technischen Komitees TC 1-62. Heute arbeitet außerdem das TC 1-69 bzw. TC 1-90 an sehr ähnlichen Fragestellungen.



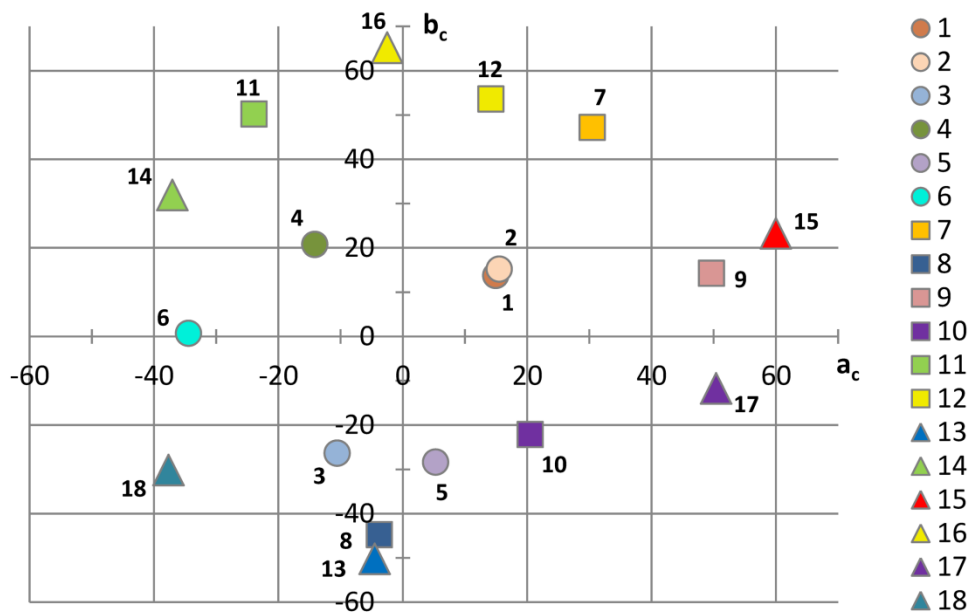


Abbildung 2.15: MBCCC-Testfarben 1-18 unter D65-Beleuchtung in der CIECAM02-Farbebene

Im Vergleich zu den CRI-Testfarben (siehe Abschnitt 2.2.1 ab Seite 20) enthält der MBCCC mehr und deutlich gesättigtere Farben. In Abbildung 2.16 sowie Abbildung 2.17 sind deutlich steilere Flanken zu erkennen als im Fall der CRI-Testfarben (Abbildung 2.12, Seite 22).

Trotz der vorgeschlagenen Änderungen ändert sich die Bewertung von Lichtquellen im Vergleich zum bestehenden CIE-Farbwiedergabeindex nur in sehr geringem Umfang. Zusammenfassend ergeben sich für die praktische Anwendung keine nennenswerten Vorteile.

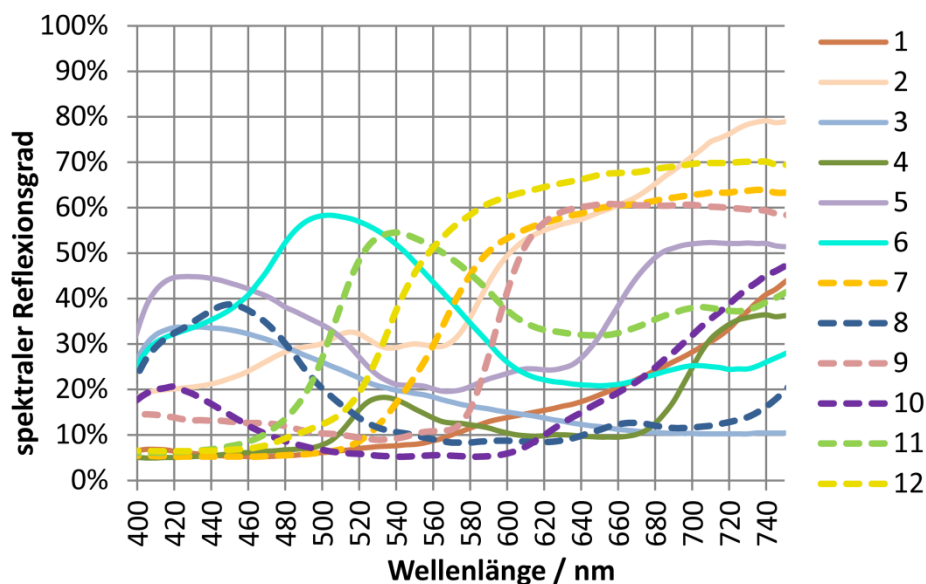


Abbildung 2.16: Spektraler Reflexionsgrad der MBCCC-Testfarben 1-12

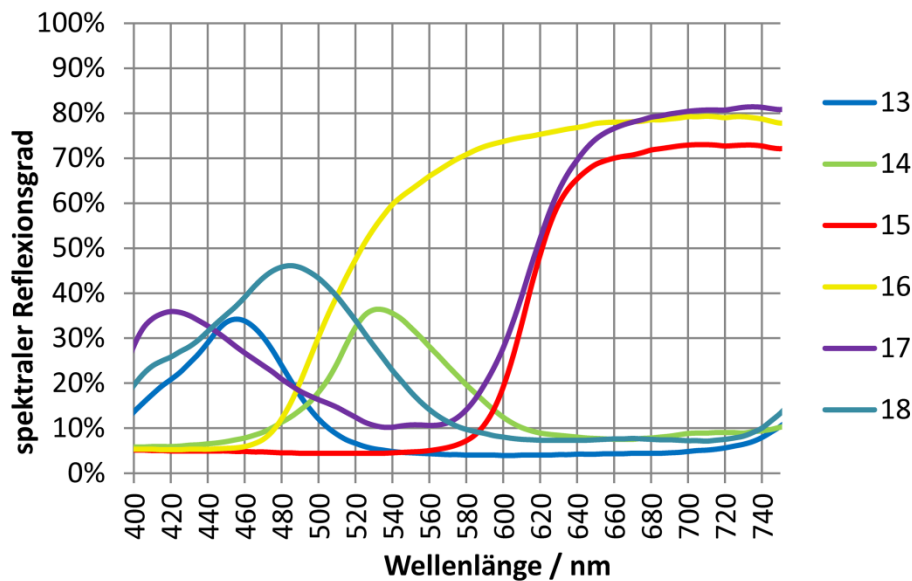


Abbildung 2.17: Spektraler Reflexionsgrad der MBCCC-Testfarben 13-18

## 2.2.4 Ergänzende und ersetzende Berechnungsmethoden für Farbqualität

Neben der CIE-Definition zur Berechnung des Farbwiedergabeindex wurde eine Reihe von weiteren Berechnungsmethoden entwickelt [69]. Die folgende Auflistung soll einen Überblick über einige Entwicklungen geben:

- Color Flattery Index [78] von Judd
- Color Preference Index [79] von Thornton
- Color Discrimination Index [7] von Thornton (flächenbasiert)
- Color Rendering Capacity Index [80] von Xu (flächenbasiert)
- Pointer Index [81] von Pointer
- Matrixansatz [82] von Worthey
- Color Harmony Index [83] von Szabó
- Color Quality Scale [55, 84] von Ohno und Davis

Die Mehrzahl dieser Ansätze beschreibt zusätzliche Farbqualitätsdimensionen wie z. B. Farbpräferenz oder Farbharmonie. In manchen Fällen wird auch der Begriff der Farbwiedergabe um diese zusätzlichen Parameter erweitert und entspricht dann nicht mehr der engeren CIE-Definition, wie sie im Internationalen Wörterbuch der Lichttechnik [85] festgehalten ist. Ein Beispiel für eine solche Erweiterung ist der Color Quality Scale-Index, der als kombinierte Farbwiedergabe-Farbpräferenz-Metrik zu verstehen ist.

## Flattery Index (Judd 1967)

Judd versteht seinen Flattery Index [78] als Ergänzung des zwei Jahre zuvor veröffentlichten CIE-Farbwiedergabeindex. Er hat beobachtet, dass Objekte attraktiver erscheinen können, wenn die beleuchtende Lichtart eine Verfälschung der Objektfarbe hervorruft.

Aufbauend auf den Arbeiten von Buck [86] und Sanders [87] bestimmt Judd die präferierten Farbörter der CIE-Testfarben 1 bis 8 sowie für Hautton (13) und Blattgrün (14). Tabelle 2.7 zeigt die präferierten Farbörter für die Beleuchtung mit Normlichtart D65.

Die Bestimmung des Flattery Index  $R_f$  erfolgt sehr ähnlich zur Berechnung des CIE-Farbwiedergabeindex. Als Referenzlichtart dient ausschließlich Normlichtart D65. Deshalb sollte die Testlichtart eine Farbtemperatur von mindestens 3500 K aufweisen.

Tabelle 2.7: Farbörter der präferierten Farben und deren Gewichtung

No. im CIE-CRI	Farbe	$u_{p,D65}$	$v_{p,D65}$	Gewichtung
1	Altrosa	0,2456	0,3212	5%
2	Erdfarbe	0,2152	0,3397	15%
3	Gelbgrün	0,1876	0,3563	5%
4	Grün	0,1511	0,3328	5%
5	Türkis	0,1677	0,3051	5%
6	Hellblau	0,1746	0,2742	5%
7	Hellviolett	0,2115	0,2783	5%
8	helles Purpur	0,2334	0,2876	5%
13	Hautfarbe	0,2234	0,3307	35%
14	Blattgrün	0,1829	0,3428	15%

Die Farbdifferenzen zwischen den vermessenen Farbörtern unter Testlichtart und den präferierten Farbörtern unter D65 werden in der  $uv$ -Farbtafel ermittelt.

$$\Delta E_{f,i} = 800 \cdot \sqrt{(u_{p,D65} - u_k)^2 + (v_{p,D65} - v_k)^2} \quad \text{Formel 2.23}$$

Aufbauend auf den Arbeiten von Buck [86] und Sanders [87] bestimmt Judd die präferierten Farbörter der CIE-Testfarben 1 bis 8 sowie für Hautfarbe (13) und Blattgrün (14). Tabelle 2.7 zeigt die präferierten Farbörter für die Beleuchtung mit Normlichtart D65.

Die Bestimmung des Flattery Index  $R_f$  erfolgt sehr ähnlich zur Berechnung des CIE-Farbwiedergabeindex. Als Referenzlichtart dient ausschließlich Normlichtart D65. Deshalb sollte die Testlichtart eine Farbtemperatur von mindestens 3500 K aufweisen.

$$R_f = 100 - 4,6 \cdot \frac{1}{5} \cdot \overline{\Delta E_{f,l}}$$

Formel 2.24

Abschließend wird mit den in Tabelle 2.7 dargestellten Faktoren gewichtet und zum Flattery Index zusammengefasst. Die Gewichtungsfaktoren basieren auf den oben genannten Untersuchungen und spiegeln die Erkenntnis wieder, dass natürliche Farbtöne wie Hautton, Blattgrün und Erdfarbe für die Beurteilung einer Lichtquelle wichtig sind, da sie mit „Gedächtnisfarben“ verglichen werden können.

Entsprechend Formel 2.24 kann der Flattery Index  $R_f$  einen Maximalwert von 100 annehmen. Das ist der Fall, wenn sich unter der Testlichtart eine Verschiebung in Richtung der präferierten Farbörter ergibt.

## Color Preference Index (Thornton 1974)

Thornton übernimmt von Judds Flattery Index zwei Punkte: Normlichtart D65 als einzige Referenzlichtart und die Idee der präferierten Farben. Allerdings schränkt er die Gültigkeit seines Color Preference Index [79] von vornherein auf Lichtarten mit Farbörtern ähnlich D65 ein. Vom Flattery Index übernimmt er die präferierten Farbörter nach Aufbauend auf den Arbeiten von Buck [86] und Sanders [87] bestimmt Judd die präferierten Farbörter der CIE-Testfarben 1 bis 8 sowie für Hautton (13) und Blattgrün (14). Tabelle 2.7 zeigt die präferierten Farbörter für die Beleuchtung mit Normlichtart D65.

Die Bestimmung des Flattery Index  $R_f$  erfolgt sehr ähnlich zur Berechnung des CIE-Farbwiedergabeindex. Als Referenzlichtart dient ausschließlich Normlichtart D65. Deshalb sollte die Testlichtart eine Farbtemperatur von mindestens 3500 K aufweisen.

Tabelle 2.7 und die Berechnung der Farbdifferenzen nach Formel 2.23.

$$CPI = 156 - 7,18 \cdot \overline{\Delta E_i}$$

Formel 2.25

Der Color Preference Index benutzt im Gegensatz zum Flattery Index keine Gewichtungsfaktoren und benutzt nur die ersten acht Testfarben ( $i = 1 \dots 8$ ), analog zum CIE  $R_a$ . Der Maximalwert beträgt 156, der Faktor von 7,18 bewirkt eine Normierung der Referenzlichtart D65 auf den Wert von 100.

## Color Discrimination Index (Thornton 1972)

Thornton lässt sich bei der Gestaltung des Color Discrimination Index (CDI) [7] von dem Gedanken leiten, dass eine gute Lichtquelle dem Betrachter eine Unterscheidung möglichst vieler farbiger Objekte ermöglichen sollte. Für die Berechnung werden die acht CIE  $R_a$ -Testfarben verwendet. Die Farbörter bei Beleuchtung mit der Testlichtart werden in die  $uv$ -Farbtafel eingezeichnet. Der Flächeninhalt (Gamut Area,  $GA$ ) der aufgespannten achteckigen Fläche bildet die Basis für den Indexwert.

$$GA = 0,5 \cdot [(u_1 v_2 - u_2 v_1) + (u_2 v_3 - u_3 v_2) + (u_3 v_4 - u_4 v_3) + (u_4 v_5 - u_5 v_4) + (u_5 v_6 - u_6 v_5) + (u_6 v_7 - u_7 v_6) + (u_7 v_8 - u_8 v_7) + (u_8 v_1 - u_1 v_8)] \quad \text{Formel 2.26}$$

Der Flächeninhalt kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Null entspricht einer monochromatischen Lichtquelle, die alle Testfarben an einen Punkt der Farbtafel verschiebt und keine Fläche aufspannen kann. Den Wert eins erreicht eine (theoretische) Lichtquelle, die die gesamte Farbtafel abdecken kann.

$$CDI = 100 \cdot \frac{GA}{0,005} \quad \text{Formel 2.27}$$

Der Divisor von 0,005 bei der Berechnung des CDI stellt einen Bezug auf Normlichtart C dar, für diese Lichtart wird ein  $GA$  von 0,005 berechnet. Normlichtart C erhält also per Definition einen CDI-Wert von 100.

## Color Rendering Capacity (Xu 1983/1993)

Auch die Color Rendering Capacity [80] beschreibt die Quantität der mit der Lichtquelle darstellbaren Farben. Allerdings werden hier sowohl unterschiedliche Farbbörter in der Farbtafel berücksichtigt als auch Unterschiede in der relativen Helligkeit.

$$Y = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (0 \leq Y \leq 1) \quad \text{Formel 2.28}$$

Die relative Helligkeit  $Y$  entspricht dabei eher einer relativen Leuchtdichte als der menschlichen Hellempfindung.  $P(\lambda)$  ist die spektrale Strahldichte der Lichtquelle,  $\bar{y}(\lambda)$  die Normspektralwertfunktion und  $\rho(\lambda)$  der spektrale Remissionsfaktor der betrachteten Oberfläche. Die Anzahl unterschiedlicher darstellbarer Farben wird wie folgt ermittelt: Für verschiedene relative Helligkeitsstufen (11 Abstufungen von 0 bis 1) werden jeweils die maximal möglichen Koordinaten berechnet. Beispielsweise wird bei einer Helligkeit von 0 (schwarz) die gesamte  $uv$ -Farbtafel abgedeckt. Generell gilt hierbei, je größer die relative Helligkeit  $Y$ , umso kleiner ist der Bereich der maximal darstellbaren Farben. Dementsprechend kann bei einer maximalen Helligkeit von 1 nur noch der Farbbort der Lichtquelle selbst dargestellt werden.

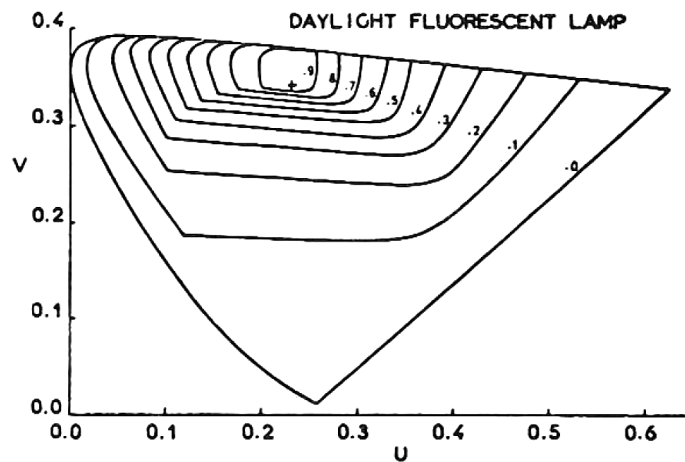


Abbildung 2.18: Beispiel zur Berechnung der Color Rendering Capacity 1983 [80]

1993 wird von Xu eine überarbeitete Version der Color Rendering Capacity veröffentlicht [9]. Dabei wird aus den oben beschriebenen Bereichen gleicher Helligkeit ein Volumenkörper erzeugt, aufgespannt von den Außenkanten der einzelnen Bereiche. Der Indexwert ist nun an das Volumen dieses Körpers gekoppelt, bezogen auf eine Referenzquelle.

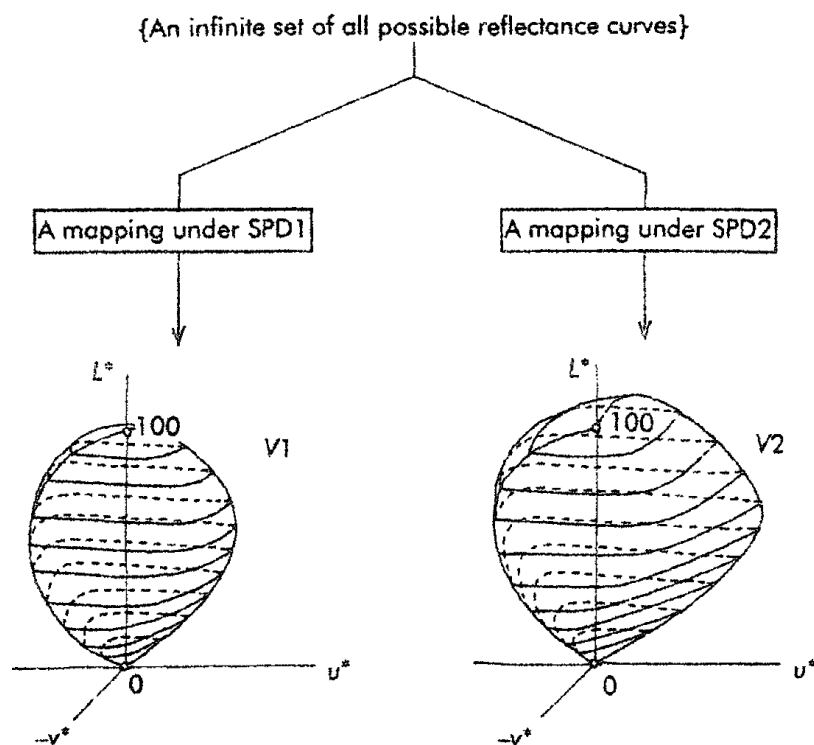


Abbildung 2.19: Prinzipielle Vorstellung der Color Rendering Capacity 1993 [9]

Grundlage der Berechnungen CRC 1993 ist der  $L^*u^*v^*$ -Farbraum. Abbildung 2.19 verdeutlicht das zugrunde liegende Prinzip: Werden alle denkbaren (theoretisch unendlich viele) Testfarben/Reflexionsspektren mit SPD1 bzw. SPD2 beleuchtet, so erhält die Lichtquelle den höheren Indexwert, die in der Lage ist die größeren Unterschiede unter allen Testfarben zu

---

erzeugen. Damit ist dieser Ansatz eher mit einer Farbpräferenzmetrik als mit einer Farbwiedergabemetrik vergleichbar.

## Pointer Index (Pointer 1986/2007)

Der Pointer Index [81] stellt einen ersetzenden Index zum CRI dar und basiert in der Version von 1986 auf dem Farbwahrnehmungsmodell von Hunt [88]. Es wird nicht nur der Betrag einer Farbverschiebung betrachtet, sondern auch nach der Richtung differenziert. Die überarbeitete Version von 2007 [89] basiert auf dem CIECAM02-Farbwahrnehmungsmodell.

Die Bestimmung der spektralen Verteilung der Referenzlichtart wird vom CIE CRI übernommen. Als Testfarben kommen alle Farbfelder des MacBeth ColorCheckerCharts (MBCCC, Abbildung 2.14) zum Einsatz. Im Folgenden wird die Berechnung des Pointer Index in der Version von 2007 beschrieben.

Für Test- und Referenzlichtart werden die Normfarbwerte  $XYZ$  und die Farbkoordinaten  $u'v'$  aller Testfarben berechnet. Aus dem CIECAM02-Modell werden die entsprechenden Parameter Bunttonwinkel, Buntton (Hue  $H$ ), Buntheit (Chroma  $C$ ) und Helligkeit (Lightness  $L$ ) berechnet. Der Vorteil bei der Verwendung von CIECAM02 liegt darin, dass eine leistungsstarke Formel zur Berechnung der Farbumstimmung (CIECAT02) bereits im Farbwiedergabemodell enthalten ist. Gesonderte Berechnungen zur Farbumstimmung (chromatischen Adaptation) müssen nicht mehr stattfinden.

Zusätzlich werden absolute und relative Werte für die vier Farben Rot, Gelb, Grün und Blau berechnet. Dabei gehen die Werte des Bunttons, beispielsweise Testfarbe  $i$  mit Buntton 70R30Y, als Gewichtungsfaktoren  $W_i$  ein. Dies bedeutet, dass der Gewichtungsfaktor  $W_i$  für eine Testfarbe  $i$  für Rot 0,7, für Gelb 0,3 und für Grün und Blau jeweils 0 beträgt.

Die gewichteten mittleren absoluten Bunttonwinkelunterschiede  $H_{Aj}$  werden für jede Farbe ( $j$  = Rot, Gelb, Grün, Blau) berechnet, ebenso die gewichteten mittleren relativen Bunttonwinkelunterschiede  $H_{Rj}$ .

$$\Delta H_{Aj} = 100 - \frac{\sum |\Delta H_i| W_i}{\sum W_i} \quad \text{Formel 2.29}$$

$$\Delta H_{Rj} = 100 - \frac{\sum \Delta H_i W_i}{\sum W_i} \quad \text{Formel 2.30}$$

Analog werden auch die Berechnungen der gewichteten absoluten und relativen Helligkeitsunterschiede  $H_{Aj}$  und  $H_{Rj}$  sowie der gewichteten absoluten und relativen Buntheitsunterschiede  $C_{Aj}$  und  $C_{Rj}$  durchgeführt. Die jeweils gewichteten absoluten Unterschiede beschreiben die Änderung zwischen Test- und Referenzlichtart und sind daher in ihrer Aussage mit dem Farbwiedergabeindex CRI vergleichbar.



$$H_A = 100 - \frac{\sum (100 - H_{Aj}) W_j}{\sum W_j}$$

Formel 2.31

Unterschiede von null und somit ein Wert von  $H_A = 100$  bedeuten dass die Farberscheinung unter Testlichtart der Erscheinung unter Referenzfarbe entspricht.

Die gewichteten relativen Änderungen können nicht sinnvoll zusammengefasst werden, da ihre Aussagen jeweils unterschiedlich sind. So gibt die relative Änderung des Buntheitswinkels an, ob beispielsweise Rot in Richtung Gelb oder in Richtung Blau verschoben wird. Die relative Änderung der Helligkeit  $L_{Rj}$  macht für jede der vier Farben eine Aussage über eine Verschiebung hin zu helleren ( $L_{Rj} > 0$ ) oder dunkleren Farben ( $L_{Rj} < 0$ ). Zusätzlich gibt die relative Änderung der Buntheit ( $C_{Rj}$ ) an, ob diese jeweils zu- ( $C_{Rj} > 0$ ) oder abgenommen ( $L_{Rj} < 0$ ) hat.

$$A = \frac{k_H H_A + k_C C_A + k_L L_A}{k_H + k_C + k_L}$$

Formel 2.32

Letztendlich wird der Farbwiedergabeindex  $A$  nach Pointer mittels Formel 2.32 berechnet. Hierbei sind  $k_{H,C,L}$  jeweils Gewichtungskonstanten.

## Matrixansatz (Worthey 2003)

Worthey wird angetrieben von der Frage, wie Kontraste in Gegenfarbensysteme (Rot-Grün bzw. Blau-Gelb) unter dem Einfluss verschiedener Lichtarten wahrgenommen werden [82].

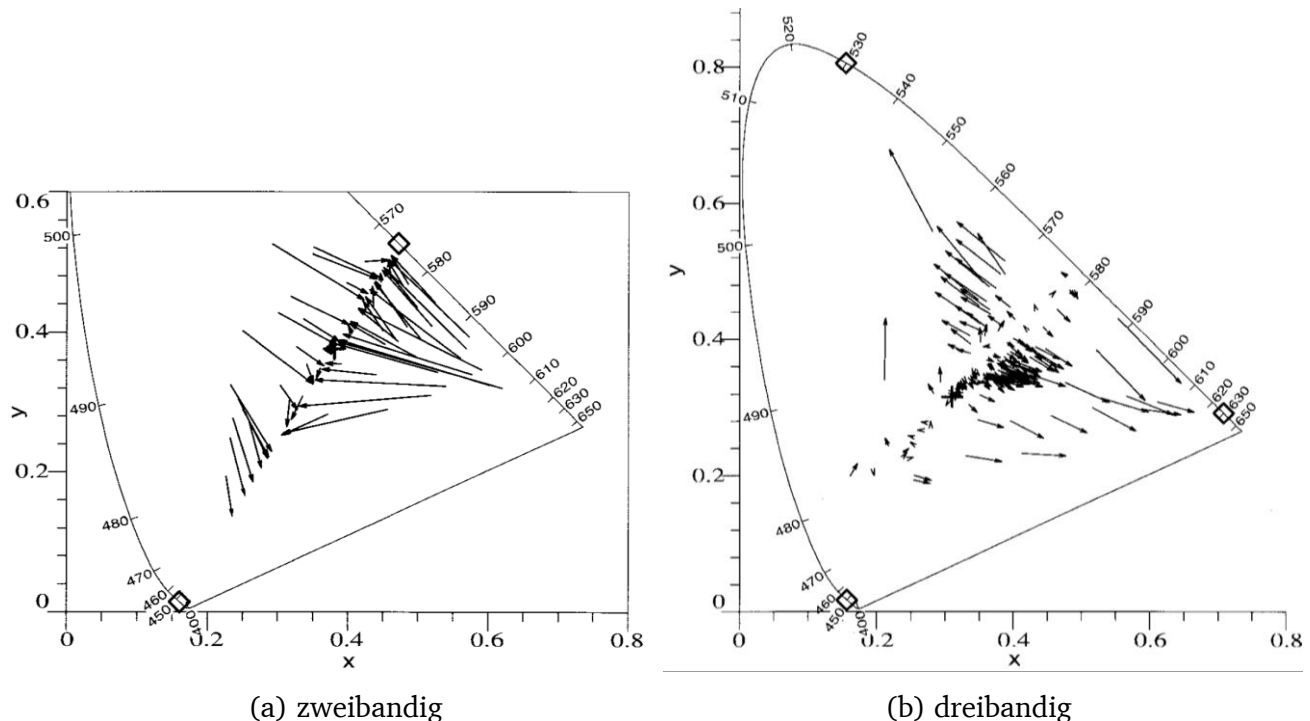


Abbildung 2.20: Verschiebung der Farbörter unterschiedlicher Lichtquellen [82]

Eine Lichtquelle kann „weiß“ empfundenes Licht durch Mischung aus „blauen“ und „gelben“ Anteilen erzeugen. Um gesättigtes Rot oder Grün unter dieser Lichtart wahrnehmen zu können, müssten die entsprechenden spektralen Anteile in der Strahlung der Lichtquelle enthalten sein. Unter einer zweibandigen Lichtquelle („blaues“ und „gelbes“ Band) werden rote oder grüne Farben zwangsweise schlecht wiedergegeben. Die Verschiebung der Farbörter erfolgt entsprechend Abbildung 3.5(a) auf eine Gerade zwischen den Farbörtern der Banden der Lichtquelle. Im Gegensatz dazu kann eine dreibandige Lampe („blaues“, „grünes“ und „rotes“ Band) den Rot-Grün-Kontrast verstärken und damit rote und grüne Farben gesättigter darstellen, wie in Abbildung 2.20(b) zu sehen ist.

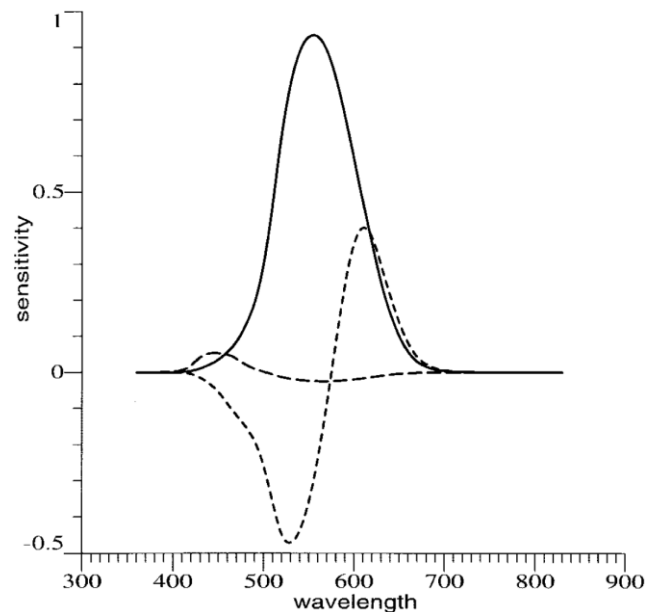


Abbildung 2.21: Orthogonale Gegenfarbspektralwertfunktionen nach Worthey: Durchgezogene Linie -  $\bar{q}_1(\lambda)$  proportional zur Hellempfindlichkeitsfunktion  $V(\lambda)$ ; Gepunktete Linie -  $\bar{q}_2(\lambda)$  rot-grün Gegenfarben; Gestrichelte Linie -  $\bar{q}_3(\lambda)$  blau-gelb Gegenfarben [82]

Das mathematische Modell zur Berechnung der Gegenfarbenkontraste [90] wird im Folgenden beschrieben. Als Eingangsdaten müssen die spektralen Strahldichten der zu vermessenden Lichtart  $L_1(\lambda)$  und einer frei wählbaren Referenzlichtart  $L_0(\lambda)$ , der spektrale Remissionsgrad  $s(\lambda)$  und die drei orthogonalen Gegenfarbspektralwertkurven  $\bar{q}_1(\lambda)$ ,  $\bar{q}_2(\lambda)$ ,  $\bar{q}_3(\lambda)$  entsprechend Abbildung 2.21 bekannt sein.

Im ersten Berechnungsschritt wird aus den Eingangsdaten der Vektor der Referenzlichtart  $Q(L_0)$  berechnet. Durch  $Q_1$  beschreibt dabei einen Helligkeitswert,  $Q_2$  den Kontrast in Rot-Grün-Richtung ( $Q_2 > 0$  rötlich,  $Q_2 < 0$  grünlich) und  $Q_3$  den Kontrast in Blau-Gelb-Richtung ( $Q_3 > 0$  bläulich,  $Q_3 < 0$  gelblich).

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} (\bar{q}_1|L_0\bar{q}_1) & (\bar{q}_1|L_0\bar{q}_2) & (\bar{q}_1|L_0\bar{q}_3) \\ (\bar{q}_2|L_0\bar{q}_1) & (\bar{q}_2|L_0\bar{q}_2) & (\bar{q}_2|L_0\bar{q}_3) \\ (\bar{q}_3|L_0\bar{q}_1) & (\bar{q}_3|L_0\bar{q}_2) & (\bar{q}_3|L_0\bar{q}_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\bar{q}_1|s) \\ (\bar{q}_2|s) \\ (\bar{q}_3|s) \end{bmatrix} \quad \text{Formel 2.33}$$

Falls keine Verschiebung durch die zu testende Lichtart auftritt, sind alle Einzelwerte gleich Eins.

Zur Berechnung der Ausgangswerte wird die Matrix  $\mathfrak{R}$  berechnet. Auch hier entsprechen die Einzelwerte bestimmten Aussagen ( $P_{11}$  Helligkeit,  $P_{22}$  Rot-Grün-Kontrast,  $P_{33}$  Blau-Gelb-Kontrast).

$$\mathfrak{R}(L_0 \rightarrow L_1) = \begin{bmatrix} (\bar{q}_1|L_1\bar{q}_1) & (\bar{q}_1|L_1\bar{q}_2) & (\bar{q}_1|L_1\bar{q}_3) \\ (\bar{q}_2|L_0\bar{q}_1) & (\bar{q}_2|L_1\bar{q}_2) & (\bar{q}_2|L_1\bar{q}_3) \\ (\bar{q}_3|L_0\bar{q}_1) & (\bar{q}_3|L_1\bar{q}_2) & (\bar{q}_3|L_1\bar{q}_3) \end{bmatrix} \quad \text{Formel 2.34}$$

Schließlich werden der Vektor  $Q(L_0)$  und die Matrix  $\mathfrak{R}$  zum Ausgabevektor  $Q(L_1)$  verrechnet.

$$Q(L_1, s_i) = \mathfrak{R}(L_0 \rightarrow L_1) Q(L_0, s_i) \quad \text{Formel 2.35}$$

## Colour Harmony Index (Szabó et. al. 2009)

In visuellen Experimenten zur Farbharmenie (colour harmony) wird eine weitere Dimension der Qualität von Lichtquellen adressiert. Probanden bewerten die Harmonie (das “gute Zusammenpassen”) einer Gruppe von 2 oder 3 Farbproben auf einer Skala. Mit den visuellen Ergebnissen können Formeln zur Vorhersage der Farbharmenie entwickelt werden [5, 6, 91]. Im nächsten Schritt kann auf einer Farbharmenie-Formel ein Index zur Bewertung von Lichtquellspektren aufgebaut werden. Vergleichbar zum Farbwiedergabeindex gibt der Indexwert  $R_{hr}$  dabei den Grad der Nicht-Veränderung der Farbharmenie bei Veränderung der Lichtquelle von Referenz- zu Testlichtart an.

$$R_{hr} = 100 + k \cdot \sum_{i=1}^n CHF_{i,ref} - CHF_{i,test} \quad \text{Formel 2.36}$$

Szabó verwendet sowohl Daten von 2-Farbproben- ( $n_2 = 17$ ) als auch von 3-Farbproben-Experimenten ( $n_3 = 5$ ). Die Gesamtzahl der verwendeten Farbprobengruppen beträgt  $n = n_2 + n_3 = 22$ . Die Farbharmenie-Vorhersagen  $CHF$  werden dabei mit Hilfe verschiedener Teilformeln aus CIECAM02-Messdaten berechnet [83]. Der Faktor  $k$  wird auf den Wert  $k = 5$  festgelegt.

Die Indexwerte zeigen eine hohe Korrelation mit visuellen Farbharmenie-Daten ( $r^2 = 0,78$ ). Für einen Satz von 82 verschiedenen Lichtquellen (inkl. Leuchtstofflampen, RGB-LEDs und Leuchtstoff-LEDs) ergibt sich eine bessere Korrelation mit dem CQS-Index ( $r^2 = 0,42$ ) als mit dem CIE CRI ( $r^2 = 0,35$ ).

## Color Quality Scale (Davis und Ohno 2010)

Die Color Quality Scale (CQS) [55, 84] wird als Ersatz für den CIE-CRI vorgeschlagen. Der Ablauf der Berechnung ist dem CRI ähnlich, Davis und Ohno führen einige Modernisierungen und Erweiterungen ein. Im Folgenden werden daher nur Unterschiede zum CRI aufgezeigt und nicht die gesamte Berechnung geschildert.

Die acht ungesättigten Testfarben des CRI werden durch 15 gesättigte Farben ersetzt, die gleichmäßig im Farbkreis verteilt sind. Als zu Grunde liegender Farbraum dient nun CIELAB und nicht mehr  $W^*U^*V^*$ . Die Ergänzungen betreffen die Einführung eines Sättigungsfaktors und eines Referenzfarbenfaktors.

Beim Sättigungsfaktor geht Ohno von der Überlegung aus, dass sich ein Zuwachs an Buntheit (chromatischer Sättigung) positiv auf die visuelle Klarheit oder die wahrgenommene Helligkeit auswirken kann. Oft wird dieser Zuwachs von Probanden präferiert und sollte daher nicht zu Lasten der Testlichtquelle angerechnet werden.

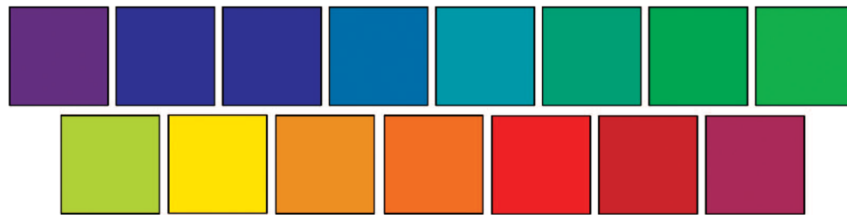


Abbildung 2.22: CQS-Testfarben [55]

Genau das geschieht aber beim CRI – egal, welche Art von Farbabweichung vorliegt (Erhöhung/Erniedrigung von Helligkeit/Buntheit/Buntheit), jede Veränderung durch die Testlichtquelle führt zu einer schlechten Bewertung im Indexwert. Die CQS macht hier eine Ausnahme, und zwar genau im Fall der Buntheitserhöhung. Damit verlässt Ohno die strenge CIE-Definition des Begriffes „Farbwiedergabe“ [85] – die Color Quality Scale ist damit als kombinierte Farbwiedergabe- / Farbpräferenz-Metrik zu verstehen.

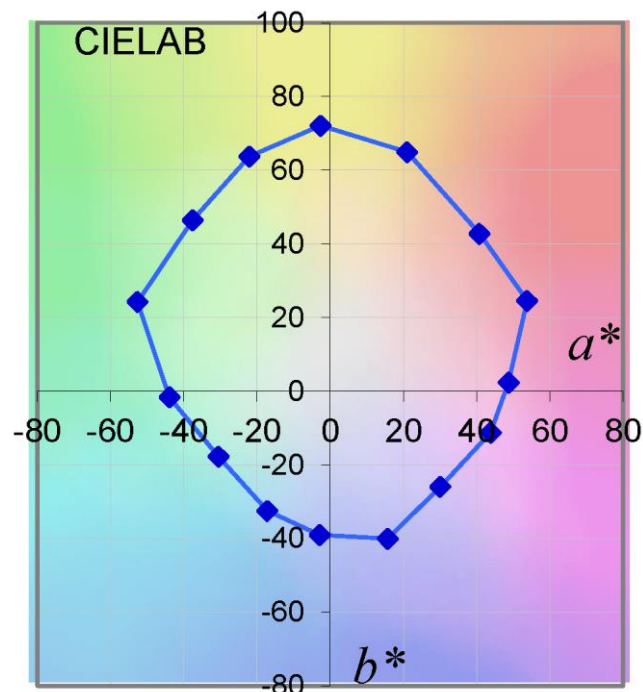


Abbildung 2.23: CQS-Testfarben unter D65-Beleuchtung in der CIELAB-Farbebene

Der Referenzfarbfaktor  $M_{CCT}$  stellt eine Abwertung für Lichtquellen mit extremen Farbtemperaturen dar. Sowohl unter extrem kaltweißen als auch unter extrem warmweißen Lichtquellen werden bestimmte Testfarben visuell unzureichend wiedergegeben, obwohl keine messbare Farbabweichung zur Referenzlichtquelle (mit ebenfalls extremer Farbtemperatur) berechnet wird.

Tabelle 2.8: CQS-Referenzfarbfaktoren für verschiedene ähnlichste Farbtemperaturen

Farbtemperatur	Gamut Area	Referenzfarbfaktor $M_{CCT}$	Farbtemperatur	Gamut Area	Referenzfarbfaktor $M_{CCT}$
1000	1579	0,19	6000	8220	1,00
1500	5293	0,65	6500	8210	1,00
2000	7148	0,87	7000	8202	1,00
2500	7858	0,96	8000	8191	1,00
2856	8085	0,99	9000	8185	1,00
3000	8144	0,99	10000	8181	1,00
3500	8267	1,00	15000	8180	1,00
4000	8322	1,00	20000	8183	1,00
5000	8354	1,00			

Der Referenzfarbfaktor ist proportional zur Gamut Area, die bei dieser Farbtemperatur dargestellt werden kann. Beispielsweise kann eine Lichtquelle mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 2000 K nur noch einen maximalen Indexwert von 87 erhalten.

Die Zusammenfassung der Farbdifferenzen der einzelnen Testfarben zu einer resultierenden Zahl erfolgt mit Hilfe des quadratischen Mittelwertes (root mean square, rms). Dadurch führen starke Abweichungen bei einzelnen Testfarben schneller zu einem schlechten Indexwert als das beim CRI mit dem einfachen arithmetischen Mittelwert der Fall ist.

$$\Delta E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta E_i^2} \quad \text{Formel 2.37}$$

Im finalen Berechnungsschritt werden sowohl beim CRI als auch bei der CQS Farbdifferenzen zu Indexwerten mit dem Maximalwert 100 umgerechnet. Der CRI-Skalierungsfaktor von 4,6 (siehe Formel 2.10) wird dabei angepasst, dass der durchschnittliche CQS-Wert für alle CIE Standard-Leuchtstofflampen F1...F12 gleich dem durchschnittlichen CRI-Wert ist ( $\overline{R_{a,F1-F12}} = \overline{Q_{a,rms,F1-F12}} = 75,1$ ). Der CQS-Vorfaktor erhält damit den Wert 3,1.

$$Q_{a,rms} = 100 - 3,1 \cdot \Delta E_{rms} \quad \text{Formel 2.38}$$

---

Eine letzte Anpassung verhindert das Auftreten negativer Indexwerte. Formel 2.39 verändert kleine Indexwerte ( $Q_{a,0-100} < 30$ ) derart, dass sie „sanft“ gegen Null auslaufen. Da sowohl CRI- als auch CQS-Werte von unter 30 allgemein eine sehr schlechte Farbwiedergabe bedeuten, ist die Verschiebung solcher Werte unproblematisch und löst das Deutungsproblem negativer Indexwerte.

$$Q_{a,0-100} = 10 \cdot \ln \left( e^{\frac{Q_{a,rms}}{10}} + 1 \right) \quad \text{Formel 2.39}$$

$$Q_a = M_{CCT} \cdot Q_{a,0-100} \quad \text{Formel 2.40}$$

Im letzten Berechnungsschritt kommt der Referenzfarbfaktor  $M_{CCT}$  zur Anwendung und der finale allgemeine CQS-Wert  $Q_a$  wird gebildet. Abschließend ist noch zu erwähnen, dass die Color Quality Scale einer stetigen Weiterentwicklung unterworfen ist. Neue Erkenntnisse in der Farbwahrnehmung werden eingearbeitet und führen zu immer neuen CQS-Versionsnummern.

## 2.2.5 Vergleich von Gou und Houser

In visuellen Experimenten findet man LED-Lichtquellen, deren visuelle Farbwiedergabeerscheinung nicht mit berechneten CRI-Werten übereinstimmt [92]. Im Folgenden werden vergleichende Studien zur Farbwiedergabe vorgestellt.

Die Autoren vergleichen in ihrer Studie [93] 34 verschiedene spektrale Strahlungsverteilungen von Lichtquellen, darunter Glühlampen, Leuchtstofflampen, Entladungslampen und Spektren verschiedener CIE-Normlichtarten. Folgende Indices werden berechnet:

- CIE-Farbwiedergabeindex CRI (1965)
- CIE-CRI (1995)
- Flattery Index
- Color Preference Index
- Pointer Index

Zusätzlich werden die flächenbasierenden Indices

- Color Discrimination Index,
- Cone Surface Area Index und
- Color Rendering Capacity verwendet.

Es werden keine visuellen Versuche mit Probanden durchgeführt. Anhand der Berechnungsergebnisse kann für jeden Index eine Reihenfolge der Lichtquellen gebildet werden. Dabei können grundlegende Aussagen getroffen werden.

- Der Unterschied zwischen beiden Versionen des CIE-CRI ist sehr gering. Die Aktualisierung 1974/1995 bewirkt also kaum Verbesserungen.
- Unterhalb von 5000 K ähnlichster Farbtemperatur (Planck'scher Strahler ist Referenzlichtquelle) ist der CRI ein relativ ungenauer Index.

- Glühlampen werden im Vergleich zu Leuchtstofflampen mit einem geringeren Farbwiedergabeindex bewertet, erhalten jedoch einen höheren Color Preference Index und eine größere Gamut Area in den flächenbasierten Indices.

Gou und Houser erkennen, dass die komplexe Farbwahrnehmung nicht mit einem einzigen Indexwert beschrieben werden kann. Nach ihrer Meinung sollten zukünftige Indices neben dem Betrag einer Farbverschiebung auch deren Richtung berücksichtigen (z. B. Pointers Index und Worthays Matrixansatz) und eine graphische Darstellung der Ergebnisse ermöglichen.

## 2.2.6 Vergleich von Jungnitsch

Die Autorin vergleicht im Rahmen ihrer Diplomarbeit [94] eine ähnliche Auswahl an Indices wie Gou und Houser:

- CIE-Farbwiedergabeindex CRI (1995),
- Flattery Index,
- Color Preference Index und
- Pointer Index;

des Weiteren die flächenbasierten Indices

- Color Discrimination Index,
- Cone Surface Area Index und
- Color Rendering Capacity;

zusätzlich die Farbwiedergabebewertung in Farbräumen bzw. mit Farbwahrnehmungsmodellen

- CIELUV,
- CIELAB und
- CIECAM02.

Als Testlichtarten kommen Leuchtstofflampen (drei- und sechsbandig, RGB-Mischung) und LEDs (warmweiß, weiß, tageslichtweiß, RGB-Mischung) zum Einsatz.

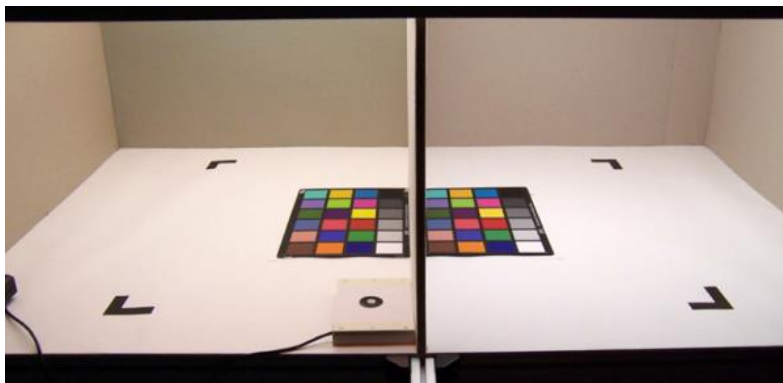


Abbildung 2.24: Versuchsaufbau für haploskopische Farbvergleiche nach Jungnitsch [94]



Neben der Berechnung der Indexwerte führt Jungnitsch auch visuelle Tests mit Probanden durch. Dabei wird eine Beobachtungsbox mit zwei Kammern eingesetzt. Die Testperson soll mit Hilfe des Fragebogens nach Abbildung 2.25 die empfundene Farbabweichung verschiedener Testfarben unter Referenz- und Testlichtquelle bewerten. Es werden Fragen zur Wiedergabetreue (Fidelity) der Testfarbe, zur Richtung der Farbverschiebung und zu Farbpräferenzen der Probanden gestellt.

**Nehmen Sie einen Unterschied zwischen der rechten und der linken Farbprobe wahr?**  
ja: ☐                      nein: ☐

**Die linke Farbprobe ist im Vergleich zur rechten:**

	1	2	3	4	5	
heller	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	dunkler
grauer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	leuchtender
wärmer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	kälter
kräftiger	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	blasser
trüber	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	reiner

**Liegt eine Farbverschiebung vor?**  
ja ☐    nein ☐

**Wenn ja, in welche Richtung?**  
R      Y      G      B

**Empfinden:**

	1	2	3	4	5	
gefällt besser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gefällt schlechter
wirkt natürlicher	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unnatürlicher

**Welche Farbprobe entspricht Ihrer Vorstellung von dieser Farbe:**  
Rechts ☐    Links ☐  
Keine ☐    Beide ☐

Abbildung 2.25: SBI-Fragebogen für visuelle Farbwiedergabetests nach Jungnitsch [94]

Für den Versuch wird ein Boxaufbau mit einer Trennwand in der Mitte gewählt. Im linken und rechten Teil werden unterschiedliche Lichtmischungen eingestellt. Die Versuchsperson sitzt mittig dicht vor der Trennwand und betrachtet mit dem linken Auge die linke Kammer, mit dem rechten Auge gleichzeitig die rechte Kammer (haploskopisches Sehen). So soll sichergestellt sein, dass die Versuchsperson gleichzeitig auf beide Lichtarten adaptieren kann. Es werden sowohl Versuche mit 6500 K Lichtquellen als auch mit 3000 K Lichtquellen durchgeführt. Dabei steht im Vordergrund, bei gleicher ähnlichster Farbtemperatur unterschiedliche spektrale Verläufe und damit unterschiedliche Farbwiedergabeeigenschaften zu testen.

Die Daten werden nach statistischer Aufbereitung zum sogenannten „subjektiven Bewertungsindex“ (SBI) zusammengefasst [94]. Der SBI stellt damit eine Art neuen Index dar, der im Gegensatz zu den anderen Indices nicht auf Berechnungen mit Hilfe des Lichtquellenspektrums beruht, sondern ausschließlich auf den Daten der eigenen visuellen Versuche.

Abbildung 2.26 zeigt beispielhaft die Indexwerte für folgende Lichtarten:

- RGB-LED-Mischung (2° Normalbeobachter)
- RGB-LED-Mischung (10° Normalbeobachter)
- weiße LED
- RGB-Leuchtstofflampen-Mischung

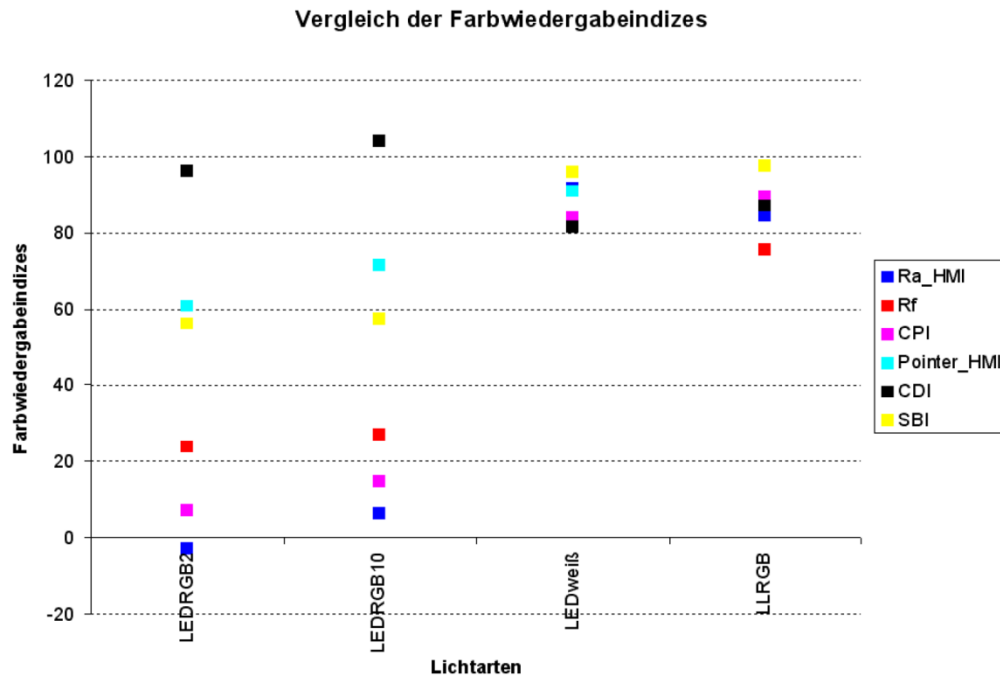


Abbildung 2.26: Indexwerte verschiedener Lichtarten nach [94]

Erkennbar ist, dass der subjektive Bewertungsindex (SBI) am besten mit dem Pointer Index und am wenigsten mit den flächenbasierten Indices korreliert. Bei Betrachtung des SBI-Fragebogens (Abbildung 2.25) fällt auf, dass Attribute des Pointers Index abgefragt werden (Wiedergabetreue, Richtung der Farbverschiebung), eine Frage beispielsweise zur Differenzierbarkeit ähnlicher Farben fehlt. Der SBI teilt damit auch einen Nachteil des Pointer Index – die fehlende Skalierung. Selbst die schlechtesten Lichtquellen, die visuell große Farbabweichungen hervorrufen (RGB-LED), erhalten Indexwerte von kaum weniger als 60. Der Wertebereich zwischen 0 und 50 wird damit praktisch nicht genutzt, die Indexwerte dürften für alle realen Lichtquellen oberhalb von 50 liegen.

In der Studie zeigt sich zwischen der Verwendung des 2°- und des 10°-Normalbeobachters kein großer Unterschied. Das CIECAM02-Farb Wahrnehmungsmodell liefert wahrnehmungsgetreuere Ergebnisse als CIELUV und CIELAB. Dass LEDs durch den CIE-CRI (1995) zu generell schlecht bewertet werden kann nicht bestätigt werden.

---

## 2.2.7 Kritik am CIE-Farbwiedergabeindex

Bei der Anwendung des CRI für weiße LED-Lichtquellen (Beschreibung des Berechnungsverfahrens siehe Abschnitt 2.1) ist in bestimmten Situationen eine schlechte Übereinstimmung des Indexwertes mit visuellen Beobachtungen zu erwarten [95] [65].

### Referenzlichtquelle und chromatische Adaptation

Schon in der ersten Version des CIE-Farbwiedergabeindex ist den Autoren klar, dass die Verwendung einer einzigen Referenzlichtquelle ideal wäre [25]. Diese Lösung ist aber nicht praktikabel umsetzbar, da leistungsfähige Formeln zur Beschreibung der chromatischen Adaptation fehlen. So wird 1965 eine vorläufige Lösung mit einer Vielzahl von Referenzlichtquellen definiert (siehe Abschnitt 2.2.1), mit der Aussicht auf spätere Verbesserungen.

Die Umschaltung der Referenzlichtart vom Planckschen Strahler auf Tageslicht bei 5000 K führt zu Inkonsistenzen im Farbwiedergabeindex, so kann sich der berechnete  $R_a$ -Wert ungewollt sprunghaft ändern, wenn die Testlichtquelle durch leichte Veränderungen (z. B. Farbmischung, Temperatureffekte) die 5000 K-Grenze überschreitet.

Verschiedene Autoren untersuchten verbesserte Formeln zur chromatischen Adaptation und schlugen entsprechende Veränderungen des CIE-Farbwiedergabeindex vor [96, 97]. Besonders bietet sich der Einsatz der in Farberscheinungsmodellen enthaltenen Formeln an, z. B. CIECAT02 in CIECAM02.

### Farbraum, Farbdifferenzformel

Der in der aktuellen Definition des CIE-Farbwiedergabeindex verwendete 1964 CIEUVW-Farbraum gilt in puncto Gleichabständigkeit als überholt. Nach Untersuchungen von Opstelten 1980 [98] ändert sich die Reihenfolge der  $R_a$ -Werte von 29 Leuchtstofflampen aber nicht, wenn 1964 CIEUVW Farbdifferenzformel durch die 1978 CIELUV-Formel ersetzt wird. Ebenso wenig bewirkt der Ersatz des CIE 1931 2°-Normalbeobachters durch den CIE 1964 10°-Normalbeobachter eine Änderung. Auch Schanda [96] stellt 1981 fest, dass eine Änderung zu 1976 CIELUV kaum wahrnehmbare Verbesserungen bringt, 1976 CIELAB zeigt schon deutlichere Veränderungen. Entsprechend schlägt auch 1996 das CIE Technische Komitee zur Überarbeitung des Farbwiedergabeindex CIELAB vor (siehe Abschnitt 0).

Später schlugen Autoren wie Schanda [99], Sandor et. al. [64, 65, 100], Bodrogi et. al. [101, 102], Brückner et. al. [103], Li et. al. [66] und Smet et. al. [67] neue Farbräume vor, die in Farberscheinungsmodellen wie CIECAM02 Verwendung finden. Sie stellen aktuell die in puncto Gleichabständigkeit besten Farbräume dar und eignen sich daher sehr gut als Grundlage für einen Farbwiedergabeindex.

---

Andererseits besteht auch ein Problem mit der Farbmimetrik (CIE 1931): Ein visueller Abgleich mit schmalbandigen Lichtquellen stimmt oft nicht mit dem messtechnischen Abgleich überein [58, 59]. Hier sind grundlegende Fragen der niederen Farbmimetrik zu beantworten.

## Schmalbandige Lichtquellen

Der CIE-Farbwiedergabeindex wurde in den 1960er definiert, als die zweite Generation von Leuchtstofflampen auf den Markt kam; es bestand der Bedarf, die Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen messtechnisch zu erfassen [104]. Heute wird diese Berechnungsvorschrift auch auf neue Halbleiterlichtquellen angewendet. Es zeigt sich, dass bereits kleine Verschiebungen der LED-Peakwellenlänge deutliche Änderungen des Indexwertes bewirken können [65]. Die Berechnungsvorschrift der CIE scheint für RGB-LEDs wenig geeignet zu sein, die visuelle Farbwahrnehmung vorherzusagen [92, 100]. Bereits 1965 war bekannt, dass spektral schmalbandige Lichtquellen nicht zur Bewertung durch den CRI geeignet sind (siehe Abschnitt 2.1).

Andererseits demonstrierte Neumann [105] eine weiße Lichtquelle bestehend aus vier extrem schmalbandigen Laserlichtquellen mit einer Halbwertsbreite (FWHM) von unter 2 nm und berichten über gute rechnerische Farbwiedergabeeigenschaften. Die verwendeten Wellenlängen liegen bei 457, 532, 589 und 635 nm. Offensichtlich ist es also möglich, mit vier schmalbandigen Emitttern weißes Licht mit guten Farbwiedergabeindizes zu mischen. Ob diese Lichtquelle in visuellen Experimenten gute Farbwiedergabeeigenschaften zeigt, muss nach den Erfahrungen mit RGB-LEDs aber bezweifelt werden. Das verdeutlicht die gängige Praxis bei der Lichtquellenentwicklung: Die spektrale Verteilung wird auf einen bestimmten  $R_a$ -Wert hin optimiert. Änderungen an der Berechnungsvorschrift des Farbwiedergabeindex können unter Umständen zum Nicht-Erreichen des  $R_a$ -Zieles führen und stoßen daher oft auf Ablehnung durch die Industrie [77].

## Testfarben

Die originalen acht Testfarben wurden von Nickerson vorgeschlagen und entstammen dem Munsell-Farbsystem. Sie stehen für visuelle Experimente heute nicht mehr real auf Papier zur Verfügung. Metamere gedruckte Farbsamples mit geänderten spektralen Remissionsfaktoren aber gleichen Farbkoordinaten können bereits deutliche Änderungen des Indexwertes bewirken [97, 106].

Bei der Auswahl der CRI-Testfarben wurde darauf geachtet, dass alle acht Farben gleichmäßig im Farbkreis verteilt sind. Die Weiterentwicklung visuell gleichabständiger Farbräume wirft die Frage auf, ob die Testfarben auch nach heutigen Gesichtspunkten eine gute Wahl darstellen. Ohno wählt für die Color Quality Scale stark gesättigte, gleichmäßig in der CIELAB  $a^*b^*$ -Farbtafel verteilte Testfarben [55].

Opstelten [98] kommt 1980 zu dem Ergebnis, dass eine Erhöhung der Anzahl der eingesetzten Testfarben nicht sinnvoll ist. In seiner Untersuchung mit 29 Leuchtstofflampen hat der Austausch der acht CIE-Testfarben durch andere Farben keinen nennenswerten Einfluss auf die Reihenfolge der  $R_a$ -Werte. Untersucht wurde sowohl ein Satz von 94 Testfarben als auch ein Satz von 13

---

gesättigten Farben. Später zeigt Bodrogi et. al. [92] jedoch, dass die Auswahl der Testfarben sehr wohl einen Einfluss auf den Indexwert haben kann. Stark gesättigte Testfarben können unter RGB-LEDs im Vergleich zu Tageslicht stark verändert erscheinen.

Die meisten Autoren stimmen darin überein, dass bei der Auswahl der Testfarben der gesamte Farbkreis abgedeckt sein sollte. Während bei der Einführung des CIE-Farbwiedergabeindex der große Rechenaufwand gegen eine große Zahl an Testfarben sprach, stellt dies mit dem heutigen technischen Möglichkeiten kein Argument mehr dar.

## Mittelwertbildung

Um den allgemeinen Farbwiedergabeindex  $R_a$  zu berechnen, wird der einfache Mittelwert der speziellen Indizes  $R_i$  für die Testfarben  $i = 1 \dots 8$  gebildet. Dadurch können extrem große Farbunterschiede in einzelnen Bereichen verdeckt werden, in diesem Fall wird der Lichtquelle eventuell ein hoher Indexwert zugeordnet obwohl sie in einzelnen Farbbereichen große Farbunterschiede verursacht. Dieses Verhalten kann durch quadratische Mittelwertbildung verbessert werden, wie sie in CQS und CRI2012 eingesetzt werden (siehe Formel 2.37 auf Seite 38).

## Fehlende semantische Interpretation

In der Anwendung des Farbwiedergabeindex bleiben – besonders für nicht-professionelle Anwender, etwa bei der Auswahl von Lichtquellen im Heimbereich – Fragen unbeantwortet. Stellt eine Lichtquelle mit einem  $R_a$ -Wert von 80 eine gute Farbwiedergabe sicher? Wie viel besser ist dem gegenüber eine Lichtquelle mit  $R_a = 90$ ? In solchen Fällen liefert der rein numerische Farbwiedergabeindex keine ausreichenden Antworten, er liefert keine semantische Interpretation.

Notwendig wäre hierfür eine Einteilung der numerischen Werte in semantische Kategorien [102]. Damit wäre jedem Indexwert eine Bedeutung zugewiesen. Mögliche Kategorien wären „sehr gut“, „gut“ usw. Als zweiter Schritt wäre eine semantische Skalierung wünschenswert, damit würde beispielsweise eine Erhöhung des Indexwertes um 10 auf einem Niveau von z. B. 50 und 80 einem vergleichbar großem Zugewinn entsprechen.

## Extreme Farbtemperaturen

Sind Lichtquellen mit sehr niedrigen bzw. sehr hohen korrelierten Farbtemperaturen in der Lage, eine gute Farbwiedergabe zu bieten? Kann beispielsweise eine Kerze oder eine gedimmte Glühlampe (CCT <2000 K) blauen Jeansstoff genauso differenziert erscheinen lassen wie unter Sonnenlicht? Viele praktische Beobachter verneinen das [107], aufgrund des kaum vorhandenen Strahlungsanteils im blauen Spektralbereich erscheint das auch plausibel. Da gleiche gilt für Lichtquellen extrem hoher korrelierter Farbtemperatur, deren spektraler Anteil im Rotbereich sehr gering ist. Der CIE-Farbwiedergabeindex bildet diese Effekte nicht ab. Ein Ausweg wäre die Abwertung von Lichtquellen extremer Farbtemperatur [55, 107], so können diese Lichtquellen

---

beispielsweise im CQS-Index nicht mehr den höchsten Indexwert von 100 erhalten (siehe dazu Abschnitt 2.2.4 ab Seite 36).

## Weiteres

Nach der gültigen Berechnungsvorschrift können negative  $R_a$ -Werte auftreten, dies ist zum Beispiel für die orange Natriumdampf-Niederdrucklampe der Fall, die in der Straßenbeleuchtung eingesetzt wird. Wie interpretiert man dieses Ergebnis? Ist eine Lichtquelle mit  $R_a = 0$  besser als eine mit  $R_a = -20$ ? Beide Lichtquellen sind zur Wiedergabe von Farben sehr schlecht geeignet, der  $R_a$ -Wertebereich sollte auf den Zahlenraum von 0...100 beschränkt werden.

Der Farbwiedergabeindex der CIE wurde mit dem Ziel entwickelt, ein Messinstrument für die „natürliche“ Erscheinung von farbigen Objekten unter künstlichen Lichtquellen zu schaffen. Er wurde nicht entwickelt, um Fragen wie die folgenden zu beantworten:

- Wie gut können unter der künstlichen Lichtquelle Farben unterschieden werden? → Colour discrimination
- Führt diese Lichtquelle zu einer Bevorzugung bestimmter Farben? Gefallen bestimmte Farben besser als unter einer anderen Lichtquelle? → Colour preference, spielt evtl. bei Kaufentscheidungen eine Rolle
- Wirkt ein Ensemble von Farben unter dieser Lichtquelle genauso wie unter Sonnenlicht? → Colour harmony
- Wie kontrastreich erscheint die Umgebung unter dieser Lichtquelle? → Visual clarity

Leider wird das im praktischen Gebrauch häufig nicht beachtet. Zum Teil werden diese Fragen von zusätzlichen Indizes oder Metriken adressiert (siehe auch Abschnitt 2.2.4).

### 2.2.8 Neudefinition des CIE-Farbwiedergabeindex: CRI 2012

Im Jahr 2007 verabschiedet die CIE den Technical Report 177:2007 [108], der sich mit der Anwendbarkeit des CRI für weiße LEDs beschäftigt. Mit der Auswertung von drei unterschiedlichen visuellen Probandentests wird die schlechte Eignung des CRI für Beschreibung der Farbwiedergabeeigenschaften weißer LED-Lichtquellen belegt. „Die Schlussfolgerung des Technischen Komitees ist, dass die CRI-Methode generell nicht anwendbar ist, um eine Anzahl von Lichtquellen gemäß ihrer Farbwiedergabe einzuordnen, wenn weiße LEDs darunter sind“ [108]. Auch wenn diese Formulierung eher für RGB-LED-Mischungen zutrifft – für weiße LEDs mit mehreren Leuchtstoffen und gefülltem Spektrum liefert der CRI erfahrungsgemäß brauchbare Ergebnisse – so zeigt sie doch, dass die Experten in der CIE Probleme bei der Anwendung des CRI auf neue Lichtquellen sehen. Abschließend wird empfohlen, einen neuen Farbwiedergabeindex zu entwickeln.

Schon seit der Einführung des CIE-Farbwiedergabeindex im Jahr 1965 wurden Verbesserungen vorgeschlagen, siehe dazu auch Abschnitte 0 und 2.2.4. Die Diskussionsbeiträge der letzten Jahre beschäftigten sich mit allen Kritikpunkten des CRI: der chromatischen Adaptation, dem nicht gleich-

---

abständigen Farbraum, dem Verhalten bei schmalbandigen Lichtquellen, den zu wenigen Testfarben und deren optimale Auswahl, der Mittelwertbildung sowie der nicht optimalen Skala und deren semantischer Interpretation [1, 66, 102, 103, 109-125].

Nach einigen Jahren kontroverser Diskussionen im Technical Committee TC 1-69 (Colour Rendition by White Light Sources) liegt der CIE nun ein breit akzeptierter Vorschlag zur Neudefinition vor [67]. Er firmiert unter dem Namen CRI 2012, es wird eine Verabschiedung durch CIE TC 1-90 (Colour Fidelity Index) im Laufe des Jahres 2014 erwartet. Welche Veränderungen bringt der CRI 2012 im Detail?

## Ablauf der Berechnungen

Das grundlegende Ablaufschema bleibt unverändert. Es wurde im Detail verbessert und besteht aus folgenden Punkten:

- Ähnlichste Farbtemperatur (CCT) der Testlichtquelle bestimmen (unverändert),
- Spektrale Strahlungsverteilung der Referenzlichtquelle berechnen (unverändert),
- Farbwerte  $XYZ_{10}$  der Testfarben unter Test- und Referenzlichtquelle berechnen (neu: 10°-Beobachter),
- CIECAM02-UCS-Werte  $a_M$ ,  $b_M$  und  $J'$  aller Testfarben unter beiden Lichtquellen bestimmen (neu),
- Farbdifferenz  $\Delta E_i$  für jede Testfarbe  $i = 1 \dots 17$  berechnen (neu: CIECAM02-UCS),
- Mittelwertbildung und Skalierung zum finalen CRI 2012 Indexwert (neu: quadratischer Mittelwert, Skalierung verhindert das Auftreten negativer Indexwerte)

Folgende Veränderungen wurden gegenüber dem CIE-Farbwiedergabeindex 1974/1995 vorgenommen:

- Die verwendeten Testfarben sind grundlegend neu ausgewählt worden. Es handelt sich dabei um 17 synthetische Spektren.
- Statt dem CIE 1931 2°-Beobachter wird der CIE 1964 10°-Beobachter verwendet. Das umgeht Probleme des 2°-Beobachters im Blaubereich (problematisch mit einigen LED-Spektren) und sorgt für ein besseres Verhalten bei mittleren und großen Farbflächen.
- Farbdifferenzen werden im gleichabständigeren Farbraum CIECAM02-UCS ( $J'a_Mb_M$ ) gebildet.
- Statt einer einfachen Mittelwertbildung wird der quadratische Mittelwert zur Zusammenfassung aller Testfarben verwendet. Damit erhalten Extremwerte eine höhere Gewichtung.
- Die neu eingeführte Skalierung führt zu einer Skala mit Wertebereich 0...100. Negative Werte können nicht mehr auftreten.



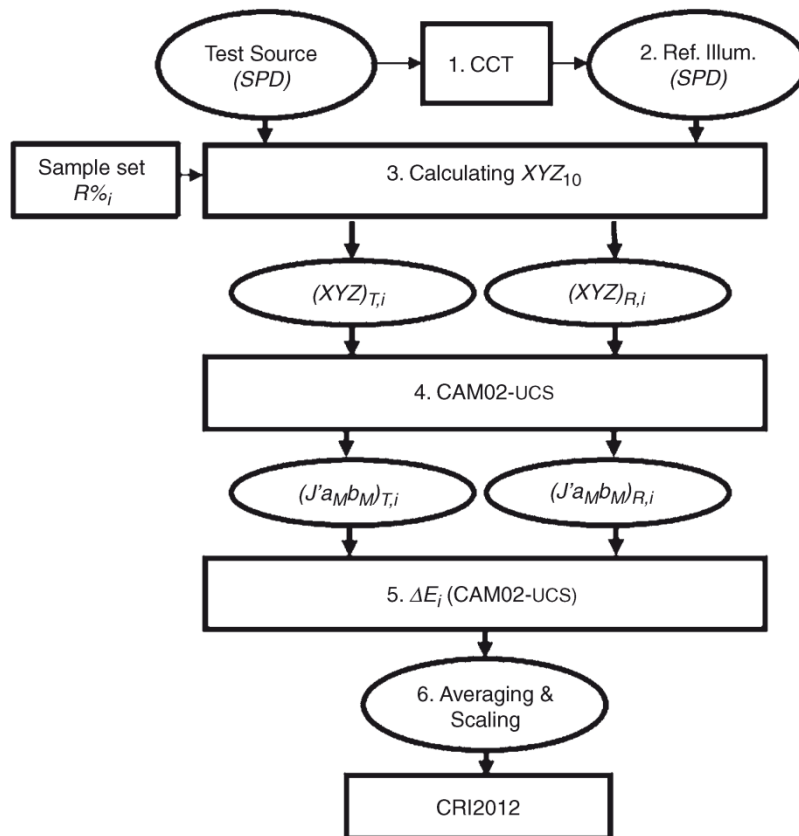


Abbildung 2.27: Ablauf der Berechnungen für den CRI 2012 [67]

## Referenzlichtquellen

Der veraltete  $U^*V^*W^*$ -Farbraum und die von Kries-Formel zur chromatischen Adaptation werden durch das Farbwahrnehmungsmodell CIECAM02 ersetzt. Trotzdem wird auch der darin enthaltenen CIECAT02-Formel zur chromatischen Adaptation nicht die zufriedenstellende Überbrückung von einer einzigen fixen Referenzlichtquelle zur jeweiligen Testlichtquelle zugetraut, so dass das bisherige Verfahren mit Berechnung einer individuellen Referenzlichtquelle unverändert bleibt. Wie bisher erfolgt bei 5000 K die Umschaltung zwischen Planckschem Strahler und Tageslichtart.

## Testfarbensatz HL17

Um den Berechnungsaufwand für den allgemeinen Farbwiedergabeindex in Grenzen zu halten wird zu diesem Zweck ein Satz aus 17 spektralen Reflexionsfunktionen definiert, genannt *HL17*. Er wird auf drei Eigenschaften hin optimiert:

- Die spektrale Verteilung soll gleichmäßig sein. Alle Reflexionsspektren sollen untereinander spektral unabhängig sein. Damit sollen hohe  $R_a$ -Werte (von darauf optimierten Lichtquellen) bei gleichzeitig schlechter visueller Performance verhindert werden.
- Möglichst viele heutige Lichtquellen sollen ihren Indexwert behalten.

- Der neue Farbwiedergabeindex soll eine hohe Korrelation mit visuellen *colour fidelity* Bewertungen aufweisen.

Als Optimum aus den genannten Eigenschaften entsteht ein Satz von 17 künstlich erschaffenen Reflexionsspektren, siehe Abbildung 2.28.

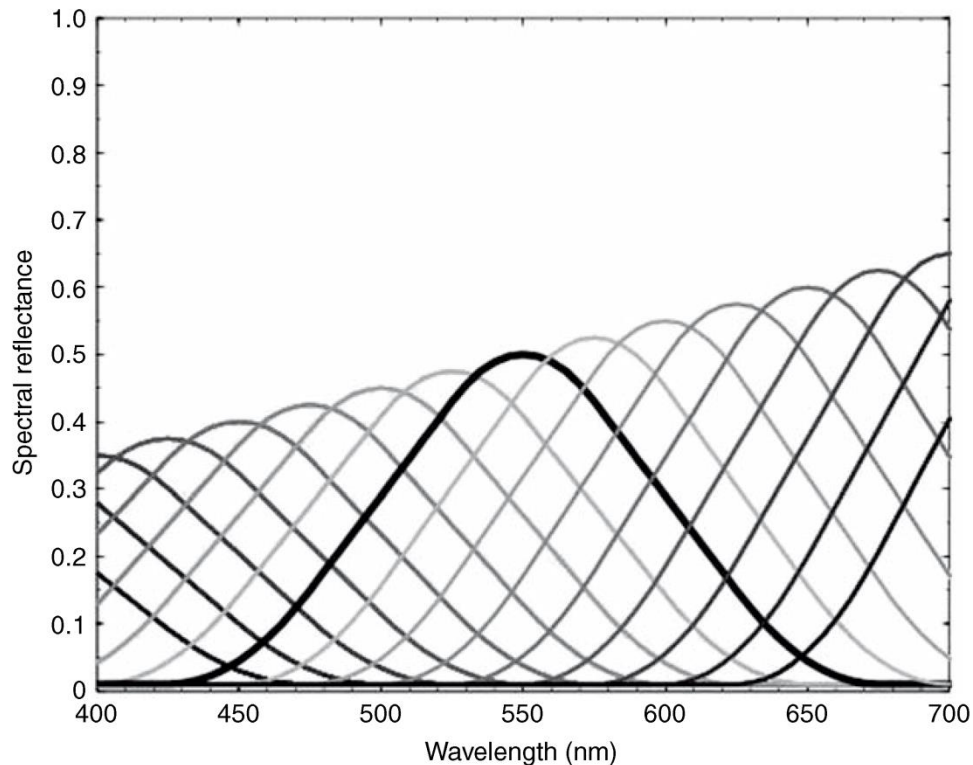


Abbildung 2.28: HL17-Testfarbensatz zur Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex [67]

Der HL17-Satz ist ausschließlich für die Kalkulation des allgemeinen Farbwiedergabeindex gedacht, die Indexwerte für einzelne Testfarben besitzen keine Aussagekraft.

## Testfarbensatz Real

Für die Berechnung spezieller Farbwiedergabeindizes wird ein Satz von 210 Reflexionsspektren definiert. Dieser setzt sich wie folgt zusammen:

- 90 Spektren mit hoher Farbkonstanz (high colour constancy, HCC)
- 90 Spektren mit niedriger Farbkonstanz (low colour constancy, LCC)
- 20 Spektren von Hauttönen (je 4 Wiederholungen von 5 unterschiedlichen Hautton-Typen)
- 10 Spektren von Malfarben aus dem Künstlerbedarf

Eine hohe Farbkonstanz liegt vor, wenn beim Wechsel der Beleuchtung zwischen D65, CIE F11 und Normlichtart A nur eine geringe Farbdifferenz auftritt. HCC- und LCC-Proben werden so gewählt, dass sie unter D65-Beleuchtung metamer sind, d. h. den gleichen Farbort aufweisen. Bei

Beleuchtungsänderung werden die LCC-Proben ihren Farbwert deutlich stärker verschieben als die HCC-Proben.

Abbildung 2.29 zeigt alle Testfarben des Real-Satzes. Das Ziel war es, die Farbebene  $a_M b_M$  mehrfach kreisförmig in gleichmäßigen Abständen abzutasten – bei hohen *colourfulness*-Werten von  $M = 30$ , mittleren Werten bei  $M = 20$  sowie drei verschiedenen *lightness*-Niveaus  $J' = 30, 50, 70$ .

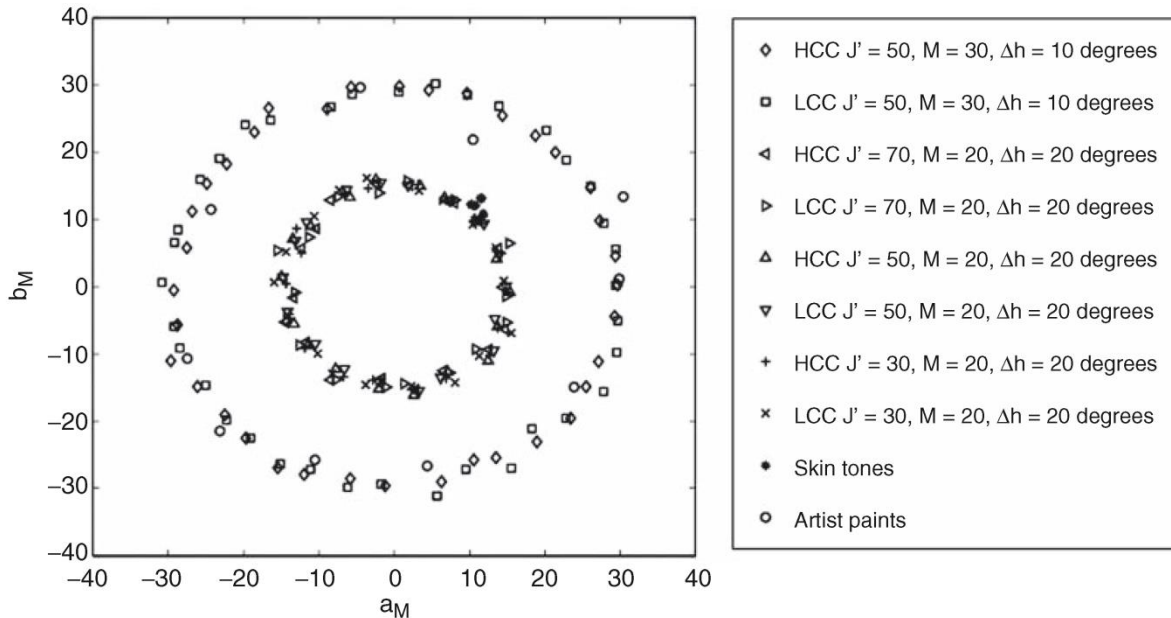


Abbildung 2.29: Real-Testfarbensatz zur Berechnung der speziellen Farbwiedergabeindizes unter D65-Beleuchtung [67]

Die 5 Hautton-Spektren vertreten 5 Haupt-Hauttypen (African, Caucasian, Hispanic, Oriental und South Asian). Um ihnen mehr Gewicht im Real-Datensatz zu geben, werden sie je viermal wiederholt und stellen so 20 der insgesamt 210 Reflexionsspektren. Schließlich sind noch 10 Spektren von natürlichen und künstlichen Farbpigmenten enthalten, die für die Erstellung von Kunstwerken benutzt werden.

Der Real-Datensatz ist nicht zur Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex gedacht, dafür fehlt ihm aufgrund der begrenzten Anzahl an verfügbaren Farbpigmenten die spektrale Unabhängigkeit der einzelnen Testfarben.

## Farbdifferenzberechnung

Für die Umrechnung in den CIECAM02-UCS  $J' a_M b_M$ -Farbraum werden folgende feste Parameter verwendet:

- Hintergrund  $Y_B = 20$
- Leuchtdichte des Adaptationsfeldes  $L_A = 100 \frac{cd}{m^2}$
- Adaptationsfaktor  $D = 1$  (vollständige Adaptation)
- Bedingung *average surround* mit  $F = 1, N_C = 1, c = 0,69$

Diese Einstellungen entsprechen visuellen Versuchen mit einer Adaptationsleuchtdichte von  $100 \frac{cd}{m^2}$  in der Umgebung des Farbreizes und einer mittleren Szenenleuchtdichte von  $20 \frac{cd}{m^2}$ . Zur Berechnung der Farbdifferenz zwischen Referenz- und Testlichtquelle wird für jede Testfarbe  $i = 1 \dots 17$  der euklidische Abstand gebildet.

$$\Delta E_i = \sqrt{(J'_{Ref,i} - J'_{Test,i})^2 + (a_{M,Ref,i} - a_{M,Test,i})^2 + (b_{M,Ref,i} - b_{M,Test,i})^2} \quad \text{Formel 2.41}$$

## Mittelwertbildung und Skalierung

Um einzelnen Testfarben mit großen Farbdifferenzen ein größeres Gewicht als bisher zu geben, werden die Einzelwerte mit dem quadratischen Mittelwert (root mean square, RMS) zusammengeführt.

$$\Delta E_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{17} \Delta E_i^2}{17}} \quad \text{Formel 2.42}$$

Um die Verwirrung um die Bedeutung negativer Indexwerte zu beenden (es war keine spezielle Bedeutung daran geknüpft), wird statt einer linearen eine S-förmige Skalierungsfunktion gewählt. Sie übersetzt den errechneten  $\Delta E_{rms}$ -Wert in den finalen Farbwiedergabeindex-Wert  $R_{a,2012}$  und läuft dabei zu den Endwerten 0 bzw. 100 sanft aus. Werte außerhalb des Bereiches 0...100 können damit nicht mehr auftreten.

$$R_{a,2012} = 100 \cdot \left( \frac{2}{e^{k \cdot |\Delta E_{rms}|^{1.5}} + 1} \right)^2 \quad \text{Formel 2.43}$$

Wie bisher können neben dem *allgemeinen Farbwiedergabeindex*  $R_{a,2012}$  auch spezielle Indizes  $R_{i,2012}$  für einzelne Testfarben aus dem *Real-Set* berechnet werden. Formel 2.44 zeigt entsprechend die Skalierungsfunktion, um für Testfarbe  $i$  von  $\Delta E_i$  nach  $R_{i,2012}$  zu übersetzen.

$$R_{i,2012} = 100 \cdot \left( \frac{2}{e^{k \cdot |\Delta E_i|^{1.5}} + 1} \right)^2 \quad \text{Formel 2.44}$$

Die Konstante  $k$  dient einer Anpassung an bisherige Lampentypen, deren Indexwerte sich möglichst nicht verändern sollen. Dazu wurden Lampenhersteller aufgefordert, einige wesentliche Lampenspektren zur Verfügung zu stellen. Durch Änderung von  $k$  kann der durchschnittliche  $R_{a,2012}$ -Wert dieser Gruppe dem durchschnittlichen heutigen  $R_a$ -Wert angepasst werden.

Zur Zeit liegen noch nicht alle angefragten Spektren vor [67]. Als Zwischenlösung wurden Werte für die CIE-Lichtquellen F1 bis F12 berechnet. Für den HL17-Testfarbensatz ergibt sich  $k = \frac{1}{55}$ , für den Real-Testfarbensatz  $k = \frac{2}{45}$ .

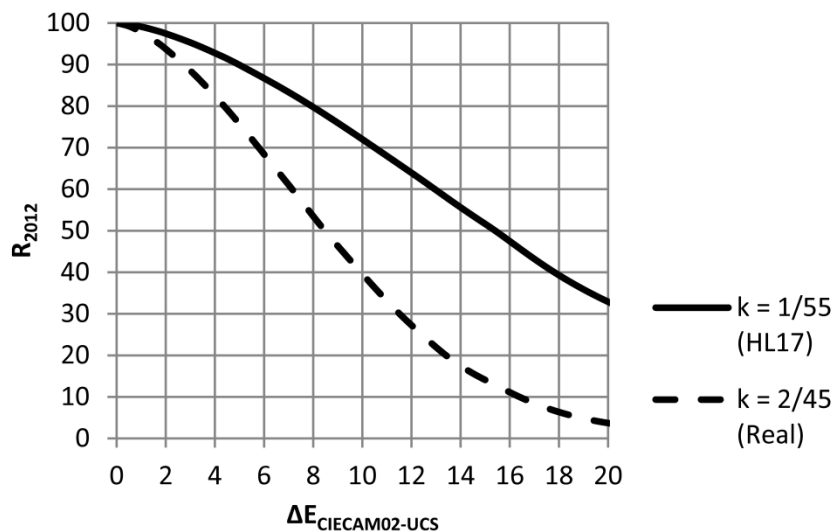


Abbildung 2.30: Vorläufige Skalierung des CRI 2012

## Abschließende Bemerkungen

Im Gegensatz zum bisherigen CIE-Farbwiedergabeindex wird der CRI 2012 auch als *colour fidelity index* bezeichnet. Nach der Uneinigkeit im CIE TC 1-69 über den Einschluss von *colour preference* in den Begriff *colour rendering* hebt er sich damit auch namentlich vom CIE-Farbwiedergabeindex ab.

Zur Beschreibung der Qualität von Lichtquellen wird ein einzelner Index nicht ausreichen, diese Aussage ändert sich auch mit der Benennung als *colour fidelity index* nicht. Weitere Dimensionen der Farbqualität müssen mit berücksichtigt werden, siehe dazu auch Abschnitt 2.2.4 „Ergänzende und ersetzende Berechnungsmethoden“.

Eine Verknüpfung der CRI 2012-Skala mit semantischen Kategorien wurde bereits von Bodrogi et. al. beschrieben [126].

## 2.3 LED-Binning

Da LEDs am Ende ihres Herstellprozesses nicht zu vernachlässigende Exemplarstreuungen aufweisen, muss eine Sortierung („Binning“) in gleichartige Gruppen („Bins“) vorgenommen werden. Davon betroffen sind vor allem Parameter wie Helligkeit, Farbe und Vorwärtsspannung.

Bis zur Veröffentlichung des ANSI/NEMA Binning-Standards im Jahr 2008 gab es in der LED-Industrie keine einheitliche Definition von Binninggruppen. Jeder LED-Hersteller definierte sein eigenes Schema und es fiel den Käufern oft sehr schwer, für die LED eines Herstellers eine gleich spezifizierte eines anderen Herstellers zu finden. Viele Hersteller orientierten sich bei der Definition ihrer Binninggruppen an den SCDM-Ellipsen (standard deviation of color matching) von MacAdam aus dem Jahr 1942 (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.4 ab Seite 8). Oft wurden die Ellipsen willkürlich

vergrößert, teilweise auch (ohne erkennbaren wissenschaftlichen Hintergrund) in zwei Hälften geteilt.

Im folgenden Abschnitt wird näher auf die bestehenden Standards sowie generelle Fragestellungen beim Binning von LEDs eingegangen.

### 2.3.1 ANSI/NEMA Binning-Standard

Der aktuelle LED-Binning-Standard „NEMA SSL 3“ [127, 128] der amerikanischen Industrie basiert auf SDCM-Ellipsen, die um einen festen Faktor vergrößert werden. Dabei orientieren sich die Standard-Binninggruppen an 7-fach vergrößerten Ellipsen (siehe Abbildung 2.31). Durch fortgesetzte Halbierung der Kantenlängen werden zusätzlich „1/4 Bins“ und „1/16 Bins“ definiert, entsprechend etwa 4-fach und 2-fach SDCM.

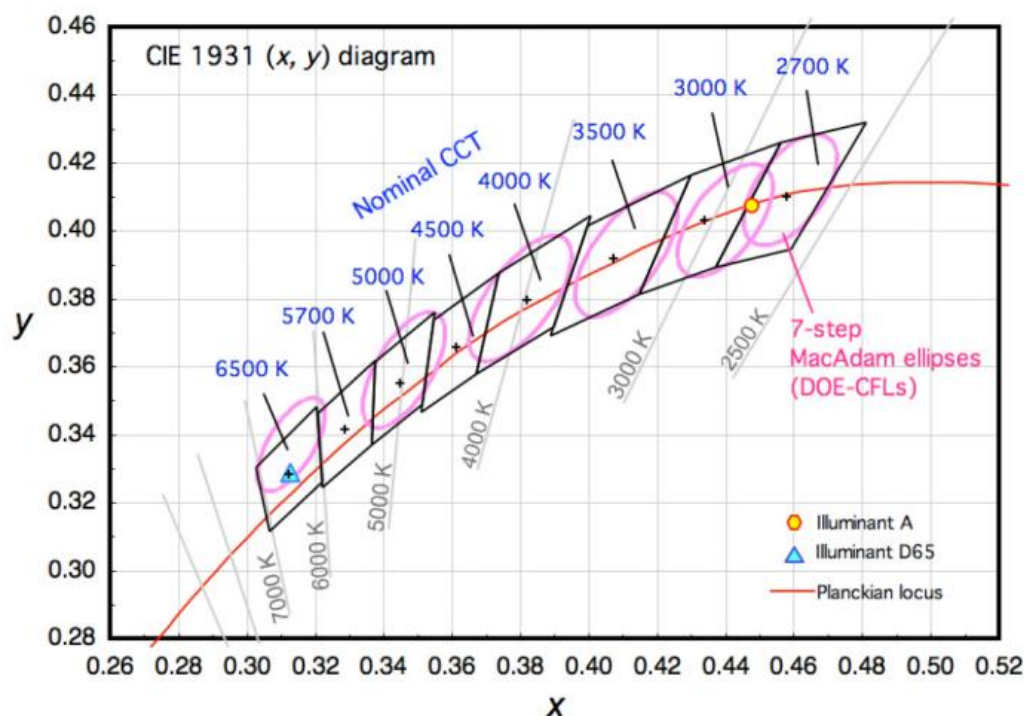


Abbildung 2.31: Standard-Binninggruppen des ANSI/NEMA-Binningstandards [127]

Dieser Binning-Standard verdient Anerkennung weil er die Funktion eines Standards als verbindliche Vereinbarung zwischen Käufer und Verkäufer erfüllt. Damit fällt der Handel mit LED-Produkten leichter als gänzlich ohne Standard. Aus rein wissenschaftlicher Sicht stellt die Praxis, für die Wahrnehmungsschwelle ermittelte Ellipsen um einen festen Faktor zu vergrößern und damit Form und Orientierung nicht anzupassen, einen höchst fraglichen Weg dar. In Abschnitt 2.1.4 „Wahrnehmungsschwelle und überschwellige Reize“ werden die Unterschiede in der Wahrnehmung von Farbdifferenzen in Größe der Wahrnehmungsschwelle und größeren Farbdifferenzen besprochen.



Ein zweiter Kritikpunkt betrifft die fehlende Semantik. Stellt der maximal zulässige Unterschied zwischen zwei LEDs innerhalb einer Binninggruppe einen sehr guten, guten oder nur annehmbaren Farbunterschied dar? Diese Deutung liefert der Standard nicht. In Kapitel 7 wird auf diesen Zusammenhang näher eingegangen.

### 2.3.2 Weiterentwicklungen

2009 veröffentlichten Schlöder und Rode [129] den Vorschlag „ABCS: Automotive Binning Colour Standard“. Er basiert auf Vierecken in der 1976  $u'v'$ -Farbtafel mit einer konstanten Kantenlänge von etwa 0,002. Damit weisen die Binninggruppen in etwa eine Größe einer unvergrößerten SDCM-Ellipse auf. Allerdings beschreibt nach MacAdam der Abstand von der Mitte bis zum Rand der Ellipse die Wahrnehmungsschwelle. Zwei Punkte an gegenüberliegenden Rändern der ABCS-Bins hätten also einen Abstand deutlich oberhalb der Schwelle. Auch ABCS bietet keine semantische Deutung.

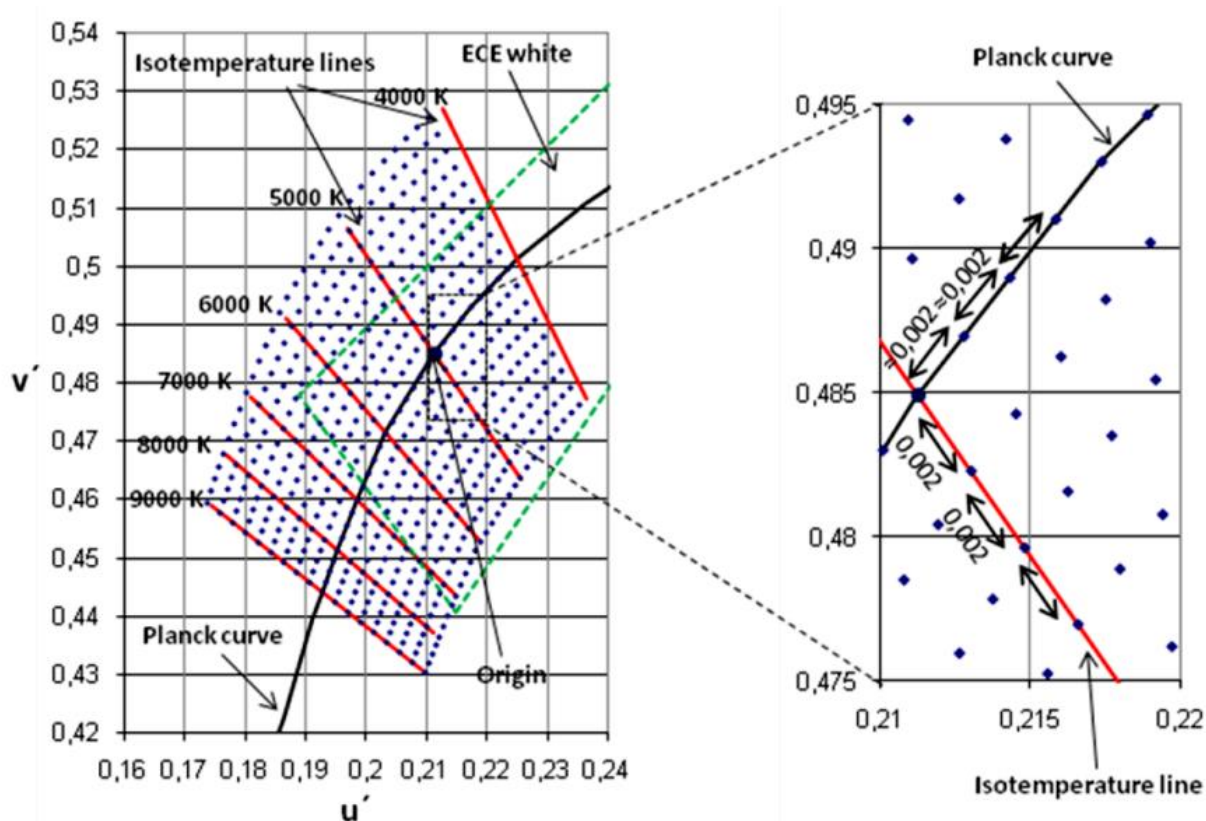


Abbildung 2.32: Definition der Binninggruppen im ABCS Automotive Binning Colour Standard [129]

### 2.3.3 Probleme beim LED-Binning

Die Probleme bei der praktischen Anwendung der heutigen Binning-Schemata gliedern sich in verschiedene Teilaspekte [130]. Im Folgenden wird darauf näher eingegangen.

---

## Wahrnehmung von Farbdifferenzen

Die Definition von Binninggruppen („Bins“) zur LED-Farbe muss sich an der Wahrnehmung von Farbdifferenzen orientieren. Prinzipiell ist es sinnvoll, Binninggruppen nach Ergebnissen zur Schwellwertwahrnehmung (SDCM-Ellipsen) auszurichten. Die Fläche einer Schwellwert-Ellipse müsste dann vier Bins umfassen, die Kantenlängen der Bins entsprechen dem Radius (nicht dem Durchmesser) der Ellipse. Damit erhält man sehr kleine Bins, die aber sicherstellen dass LED eines Bins nicht in der Farbe unterschieden werden können.

Aus verschiedenen Gründen (Messunsicherheiten, Vermarktungsstrategien etc.) kann es gewünscht sein, größere Binninggruppen zu definieren. Nun wird die Lage komplexer, es vollzieht sich der Übergang von der Schwellwertwahrnehmung zur Wahrnehmung kleiner Farbdifferenzen (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.4). Neben der Größe ändern sich auch Form und Orientierung der Ellipsen. In den heutigen Definitionen von Binninggruppen wird dies aber nicht berücksichtigt, da sie auf einfacher Vergrößerung der Schwellwertellipsen nach MacAdam beruhen.

Die Kritik an MacAdam 1942 betrifft damit auch die darauf aufbauenden Binning-Schemata: Die Versuche wurden nur mit einer Versuchsperson durchgeführt und repräsentieren damit nicht eine Grundgesamtheit. Außerdem wurde aufgrund der damals gegebenen technischen Voraussetzungen nur bei einem geringen Leuchtdichteniveau gearbeitet (Adaptation auf 24 cd/m<sup>2</sup> Umfeld), so dass man nicht von vollständig photopischer Adaptation der Testperson ausgehen kann. Im Gegensatz dazu werden die meisten Anwendungen der Binning-Schemata heute bei photopischen Bedingungen stattfinden (Blick in die Nähe der Lichtquellen, um Farbunterschiede zwischen einzelnen LEDs zu entdecken). Ein dritter Punkt betrifft die Sehfeldgröße. MacAdam benutzte ein 2° großes Sehfeld – in den meisten Anwendungen dürften aber größere Sichtbereiche interessieren. Hier bietet sich der CIE 1964 10°-Beobachter zur farbmtrischen Beschreibung an.

Die Einteilung der verursachten Farbdifferenzen in semantische Kategorien (z. B. „sehr gut“, „gut“ usw.) würde die praktische Anwendung vereinfachen, die Kommunikation zwischen allen Beteiligten könnte auf einer intuitiven Ebene stattfinden.

## Größe der Binninggruppen

Um wahrnehmbare Farbabweichungen unter den LEDs eines Bins auszuschließen müsste eine unvergrößerte SDCM-Ellipse vier Bins enthalten. Harbers et. al. [59] kommt in visuellen Versuchen mit weißen LEDs zu dem Ergebnis, dass für kritische Anwendungen mit geometrisch kleinen LED-Abständen CCT-Toleranzen auf  $\pm 60$  K, entsprechend  $\pm 0,001 \Delta uv$  beschränkt werden sollten. Das entspricht einer Größe von 1-2 SDCM-Ellipsen.

Diese größere Zahl lässt sich damit erklären, dass für diese Versuche ein (für viele Anwendungen) realistische Testaufbau gewählt wurde: Eine Reihe von LEDs beleuchtet eine Wand, LED-Anstand 10 cm, Betrachtungsabstand 1,5 m. In MacAdams Versuch beurteilte die Testperson zwei homogen leuchtende Hälften eines Kreises, die ohne Mischzone direkt aneinanderstoßen. Unter dieser Bedingung können kleinere Farbunterschiede wahrgenommen werden.



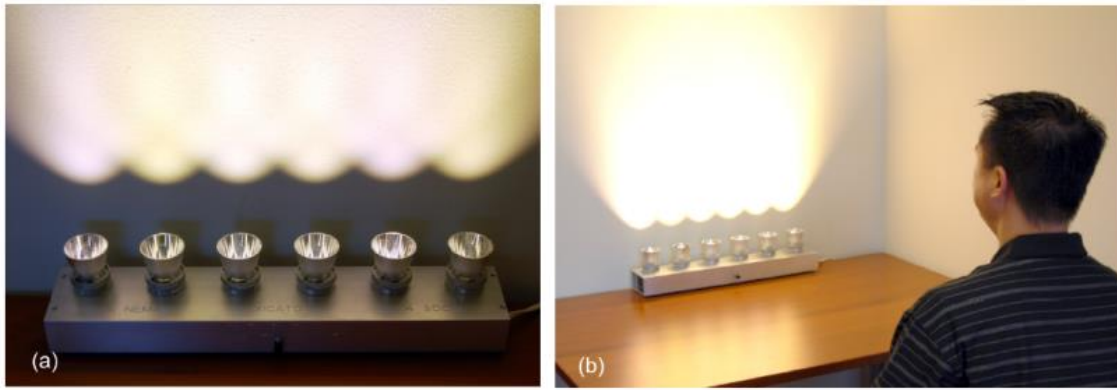


Abbildung 2.33: Testaufbau nach Harbers et. al. [59], (a) Detailansicht, (b) typische Betrachtungssituation

Harbers et. al. verwenden für die farbmetrische Bewertung den CIE 1931 2°-Normalbeobachter, wie er heute in allen farbmetrischen Messgeräten implementiert ist. Im Gegensatz dazu bewerten die Probanden die Testreize unter deutlich größeren Beobachtungswinkeln. Leider enthält die Publikation [59] keine Bewertung der Testreize durch andere spektrale Bewertungsfunktionen (z. B. dem CIE 1964 10°-Normalbeobachter). Möglicherweise erklärt das zum Teil die durch Harbers et. al. beobachteten Unterschiede zwischen visuellem und messtechnischem Farbbort [59].

Tabelle 2.9: Bewertung von Farbdifferenzen nach Harbers et al. [59], CCT  $\approx$  3000 K

	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 6
$\Delta uv$	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$\pm 0,006$
$\Delta CCT$	$\pm 60$ K	$\pm 100$ K	$\pm 175$ K
Bewertung durch Probanden	wahrnehmbarer, aber akzeptabler Farbumterschied	wahrnehmbarer Farbumterschied, nicht akzeptabel in der Architektur- und Akzentbeleuchtung	nicht akzeptabler Farbumterschied

Unabhängig davon sehen die heutigen Bin-Definitionen aber auch gegenüber Harbers et. al. deutlich größere Gruppen vor.

## Farbmetrische Messunsicherheiten

Die Definition von sehr kleinen Binninggruppen behält nur dann ihren Wert, wenn die Messunsicherheiten der Hersteller klein sind. Bisher werden von den LED-Herstellern aber oft sehr große Unsicherheiten angegeben, z. B.  $\pm 0,005$  oder  $\pm 0,01$  für  $x$  und  $y$  in der CIE 1931 Farbtabelle [129]. Das entspricht einem Vielfachen der Wahrnehmungsschwelle.

## Gültigkeit für verschiedene LED-Betriebspunkte

Sowohl Strahlungsausbeute und Peakwellenlänge von blauen LEDs als auch die Konversionsvorgänge im Leuchtstoff unterliegen nicht zu vernachlässigenden Temperaturabhängigkeiten [131, 132]. Zusätzlich ist das Verhalten der blauen LED auch von der Stromdichte abhängig. Nach Messungen von Trinh et. al. [133] verschiebt sich der Farbort von blauen LEDs bei einer Temperaturänderung von 15 °C auf 90 °C um  $\Delta u'v' = 0,0175$  (rote LEDs 0,012) und bei einer Stromänderung von 100 mA auf 1000 mA sogar um  $\Delta u'v' = 0,022$  (rote LEDs 0,009). Verschiedene weiße LED-Typen können auf Temperaturänderungen sehr unterschiedlich reagieren. Abbildung 2.34 zeigt, dass die Farbortverschiebungen durchaus wahrnehmbare Maße erreichen und je nach LED-Typ andere Richtungen aufweisen.

Was leitet sich daraus für die praktische Anwendung von LEDs ab? Zum einen sollte bei der Konstruktion von Leuchten darauf geachtet werden, möglichst nur einen LED-Typ zu verwenden. Zum zweiten sollte sowohl bei der Konstruktion als auch bei der Anwendung der Leuchten darauf geachtet werden, dass keine zu großen Temperaturunterschiede zwischen einzelnen LEDs bzw. zwischen mehreren Leuchten entstehen [134, 135]. Andernfalls können wahrnehmbare Farbunterschiede entstehen.

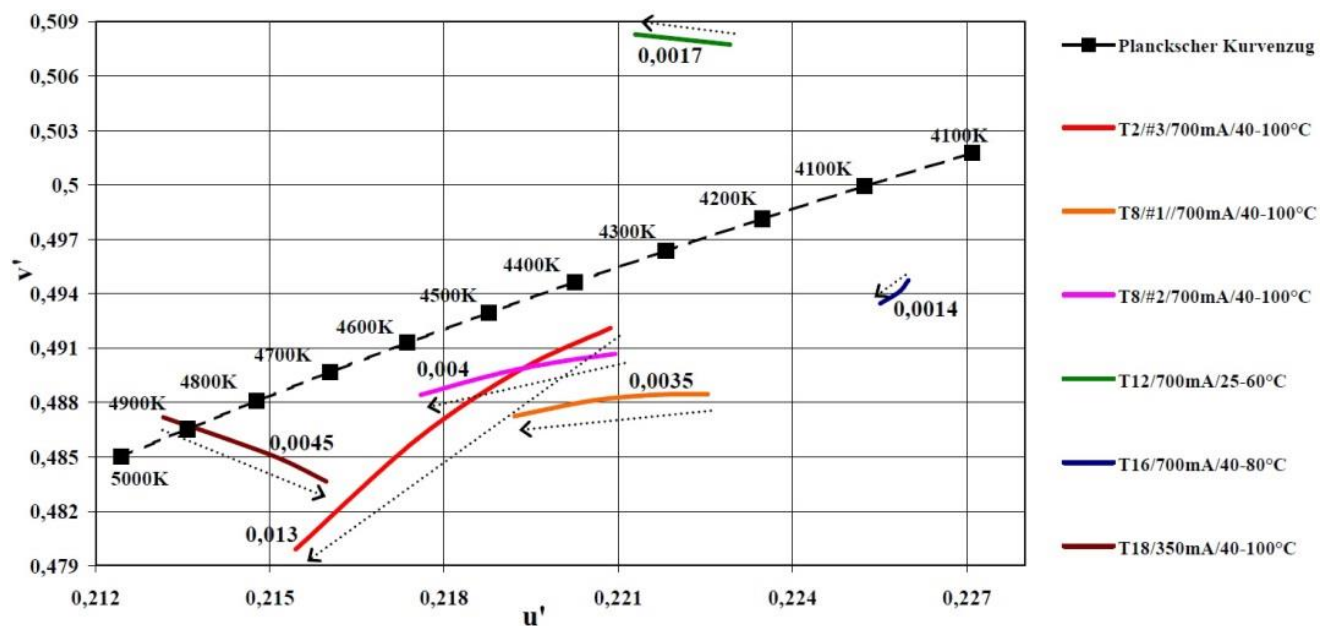


Abbildung 2.34: Farbortverschiebung verschiedener weißer LEDs bei Temperaturerhöhung [133]

Wie aber reagieren mehrere Exemplare aus einem LED-Bin auf Änderungen der Betriebsbedingungen? Verhalten sich alle gleichartig oder nehmen Exemplarstreuungen zu und die LEDs müssten nun eventuell verschiedenen Bins angehören? Dazu hat Brückner et al. [136] Untersuchungen an einem LED-Typ vorgenommen (rote Automotive-LEDs). Es zeigt sich dass eine Temperaturänderung von 25 °C auf 80 °C zu einer Erhöhung der Lichtstrom-Standardabweichung von 7,6% auf 9,2% führen kann, eine Stromänderung von 150 mA auf 5 mA sogar von 7,6% auf 11,0%. Gebinnt wurden alle LEDs bei 25 °C und 150 mA.

---

Damit wird ein Problem des heutigen LED-Binnings deutlich: Meist wird nur an einem Betriebspunkt gebinnt. Daraus entstehen zwei Fragen, die mit dem heutigen System nicht beantwortet werden. Sie müssen individuell für den betrachteten LED-Typ betrachtet werden:

1. Wurde in einem Betriebspunkt (Strom, Temperatur) gebinnt, der für die Anwendung relevant ist? Wenn nicht, wie verändern sich die LED-Parameter (Lichtstrom, Farbe usw.) von Binning-Betriebspunkt zu Anwendungs-Betriebspunkt(en)?
2. Verhalten sich alle Exemplare eines Bins bei dieser Betriebspunktänderung gleich oder ist eine Vergrößerung der Streuung („Auseinanderdriften“) der LEDs in einzelnen Parametern zu erwarten?

Eine zusätzliche Frage betrifft die Alterung der LED-Bauelemente: Werden sich alle Exemplare eines Bins gleich verhalten oder ist hier eine Vergrößerung der Streuung in den Parametern zu erwarten? Auch diese Frage kann der Anwender mit den Herstellerangaben heute oft nicht beantworten.

---

## 3 Zweikammer-Box-Versuch

In den folgenden drei Kapiteln werden visuelle Versuche beschrieben, die der Autor mit Probanden durchgeführt hat. Im Gegensatz zu vorangegangenen Untersuchungen [19, 29, 30, 37, 38, 40, 41, 47, 137-139] wird der vom Probanden empfundene Farbunterschied in *semantischen Kategorien* erfasst. Unter einer *semantischen Kategorie* wird eine Bezeichnung verstanden, der ein Intervall des Farbunterschieds-Wertebereiches zugeordnet wird. Kategorien können beispielsweise „sehr gut“ oder „schlecht“ benannt werden. Somit wird dem sonst numerisch erfassten Farbunterschied eine Bedeutung (Semantik) zugewiesen.

Der experimentelle Aufbau der Zweikammer-Box wurde bereits in zwei Publikationen beschrieben [101, 102]. Die nachfolgenden Auswertungen stellen neue Berechnungen dar und sind nicht in den erwähnten Publikationen enthalten.

---

### 3.1 Aufbau und Durchführung

---

Eine Box von ca. 1 m · 0,5 m Grundfläche mit zwei getrennten Kammern erlaubt die Beobachtung von zwei Farbproben. Dabei wird die rechte Kammer mit Hilfe der Referenzlichtquelle und einer Streuscheibe beleuchtet, die linke Kammer mit wechselnden Testlichtquellen und einer Streuscheibe. Wände und Boden beider Kammern sind mit BaSO<sub>4</sub> weiß gestrichen, so dass mit einer Leuchtdichte von 240 cd/m<sup>2</sup> ( $\pm 2\%$ ) eine photopische Adaptation sichergestellt ist.



Abbildung 3.1: Zweikammer-Box

Die Testfarben besitzen eine Größe von etwa  $4^\circ \times 3^\circ$  (siehe Abbildung 3.4) und werden binokular betrachtet, d. h. die Testperson führt zunächst das Gesicht so nah wie möglich an die Einblicköffnung der linken Kammer heran (siehe Abbildung 3.1) und beobachtet beidäugig die Farbprobe in dieser Kammer. Nach einigen Sekunden wechselt sie zur rechten Kammer und beurteilt die darin liegende Farbprobe. Der Wechsel zwischen beiden Kammern kann beliebig oft wiederholt werden. Das nahe Heranführen des Gesichtes an die Einblicköffnungen stellt eine gute Adaptation sicher, da die weißen Wände und Böden der Kammern einen großen Teil des Gesichtsfeldes einnehmen. Es stellt sich eine Mischadaptation zwischen den Lichtquellen der linken und der rechten Kammer ein. Erst nachdem die Beurteilung der Farbproben abgeschlossen ist wendet der Proband seinen Blick dem vor ihm liegenden Fragebogen zu, d. h. erst jetzt wird der Adaptationszustand verändert.

Damit wird ein wesentlicher Unterschied zu den SBI-Untersuchungen [94] an der TU Ilmenau deutlich: Dort wurde ein monokularer Beobachtungsmodus gewählt, bei dem das linke Auge nur die linke Kammer beobachtet und auf die dortige Lichtquelle adaptiert, das rechte Auge entsprechend die rechte Kammer.

### 3.1.1 Lichtquellen

Es werden zwei Gruppen von Lichtquellen getestet: Warmweiß (ca. 2700 K) und Neutralweiß (ca. 4500 K). Alle Testlichtquellen werden mit Hilfe eines Weißstandards auf dem Boxboden auf visuelle Gleichheit (Farbort, Helligkeit) zu ihrer Referenzlichtquelle eingestellt. Um visuelle Gleichheit der Testlichtquellen zur Referenzlichtquelle (Halogenglühlampe bzw. HMI-Lampe) herzustellen, werden den weißen LEDs iterativ Anteile der Rot-, Grün- oder Blau-LEDs beigemischt. Diese Schleife aus Änderung der LED-PWM-Werte, erneuter Adaptation der Testperson und Beurteilung des visuellen Farbunterschiedes zwischen Test- und Referenzlichtquelle wird sorgfältig wiederholt, bis mehrere Testpersonen die visuelle Gleichheit bestätigen. Für den visuellen Abgleich wird der Bariumsulfat-beschichtete Boxboden ohne eingelegte Farbproben verwendet. Im Fall der Leuchtstofflampen werden schrittweise farbige Filterfolien angebracht, um visuelle Gleichheit zur Referenzlichtquelle zu erreichen.

Tabelle 3.1: Warmweiße Lichtquellen (CCT ca. 2700 K)

Lichtquelle	Beschreibung	CCT [K]	x	y	R <sub>a</sub>
TUN	Halogenglühlampe (Referenzlichtquelle)	2762	0,460	0,419	97
HC3L	Weiß LED	2798	0,448	0,401	97
C3L	Weiß LED	2640	0,476	0,432	67
RGB27	RGB-LED	2690	0,462	0,414	17
FL627	Leuchtstofflampe 640 mit Farbfiltern	2786	0,456	0,415	64
FL927	Leuchtstofflampe 930 mit Farbfiltern	2641	0,466	0,414	90

Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 sowie Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 zeigen die Messwerte der visuell abgeglichenen Lichtquellen. Die farbmtrischen Werte (Farbtemperatur, Farbort) der

Testlichtquellen weichen von den Werten der Referenzlichtquellen ab. Der messtechnisch verwendete 1931 2°-Normalbeobachter weicht von den Testpersonen des visuellen Abgleiches ab (siehe auch [59]).

Tabelle 3.2: Neutralweiße Lichtquellen (CCT ca. 4500 K)

Lichtquelle	Beschreibung	CCT [K]	x	y	R <sub>a</sub>
HMI	HMI-Entladungslampe (Referenzlichtquelle)	4390	0,362	0,353	92
HC3N	Weißer LED	4869	0,349	0,355	95
C3N	Weißer LED	4579	0,363	0,393	69
RGB45	RGB-LED	4438	0,361	0,355	22
FL645	Leuchtstofflampe 640 mit Farbfiltern	4423	0,365	0,371	69
FL945	Leuchtstofflampe 954 mit Farbfiltern	4391	0,366	0,372	92

Alle Lichtquellen werden auf eine Beleuchtungsstärke von 1000 lx am Boxboden abgeglichen. Da sowohl der Boden als auch die Wände beider Kammern vollflächig mit nahezu ideal weiß reflektierendem Bariumsulfat ( $\text{BaSO}_4$ ) beschichtet sind, ist die photopische Adaptation der Testpersonen durch eine Umfeldleuchtdichte von ca. 330 cd/m<sup>2</sup> sichergestellt.

Die resultierenden spektralen Verteilungen der verwendeten Lichtquellen werden mit Hilfe eines Weißstandards und eines regelmäßig kalibrierten Spektroradiometers Konica Minolta CS-1000 vermessen (siehe Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3), die colorimetrischen Parameter sind in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 dargestellt.

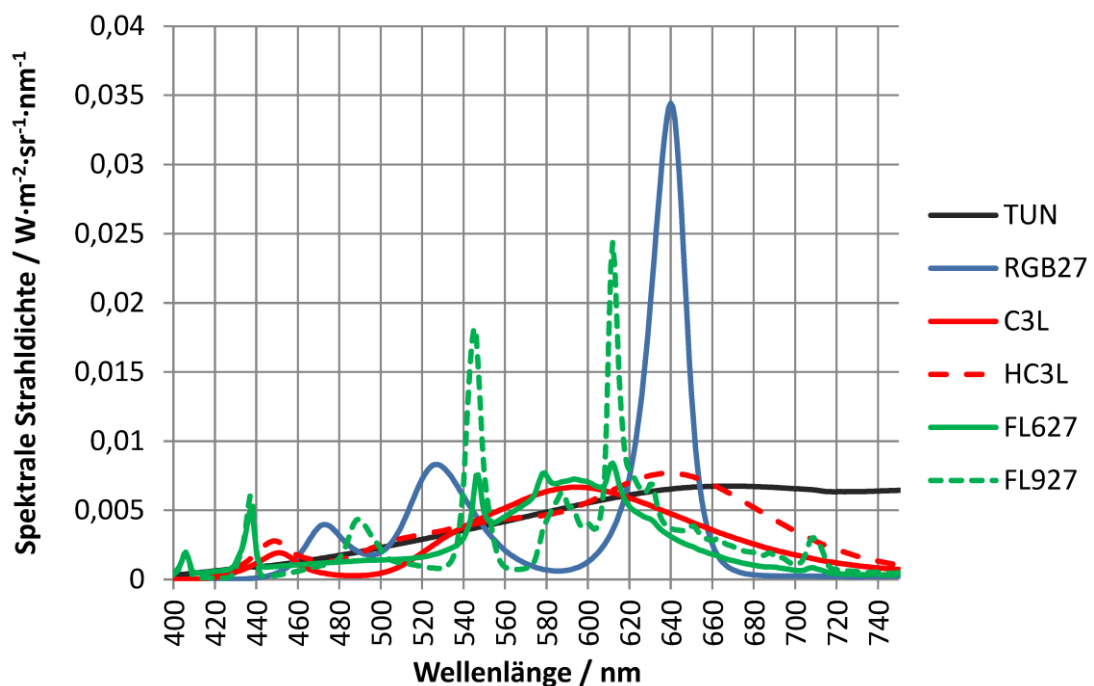


Abbildung 3.2: Spektrale Verteilung der Lichtleistung (warmweiße Lichtquellen)

Es wird großer Wert auf die thermische Stabilität der LED-Lichtquellen gelegt. Ein gesonderter Mikrocontroller steuert mittels Zweipunktregler Heizwiderstände auf dem LED-Kühlkörper und hält die Kühlkörpertemperatur mit einer Abweichung von  $\pm 1^\circ\text{C}$  unter allen Betriebsbedingungen konstant. Eine Signal-LED zeigt nach dem Einschalten das Ende des Aufheizprozesses an, so dass der Versuchsleiter mit der Durchführung beginnen kann.

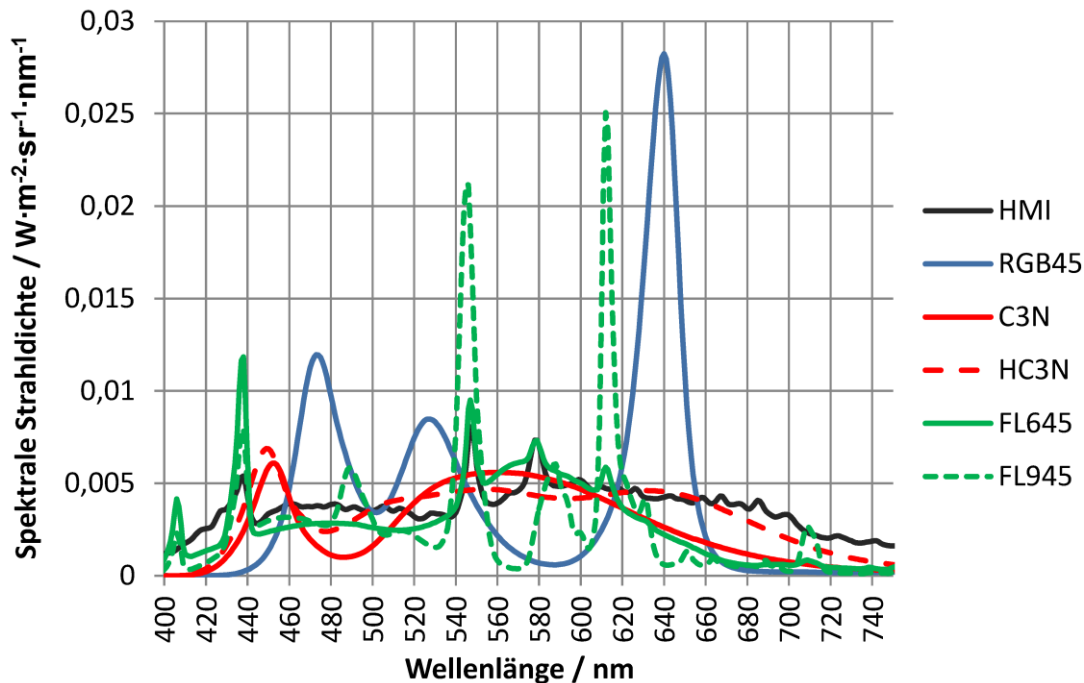


Abbildung 3.3: Spektrale Verteilung der Lichtleistung (neutralweiße Lichtquellen)

Alle LEDs werden mit einem Strom von 350 mA betrieben und durch PWM-Dimmung in der Helligkeit eingestellt. Dabei wird eine Wiederholfrequenz von 450 Hz verwendet, um sichtbares Flimmern auszuschließen. Eine Bittiefe von 15 Bit pro Farbkanal erlaubt eine sehr feinstufige Einstellung.

Um die Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit der eingestellten Lichtquellen zu erhöhen, werden vor Beginn des Abgleiches alle Lichtquellen (inkl. LEDs, Glüh- und Leuchtstofflampen) mindestens 100 Stunden bei voller Leistung eingebrannt. Erfahrungsgemäß stabilisieren sich Lichtstrom und Farbort der Lichtquellen in dieser Zeit.

### 3.1.2 Testfarben

In beide Kammern werden identische Testfarben eingelegt, ein wahrgenommener Unterschied entsteht also ausschließlich durch die Lichtquelle. Die Farbproben bestehen aus matt bedrucktem Papier und werden unter einem Sehwinkel von ca.  $4^\circ \cdot 3^\circ$  beobachtet. Umgeben sind die Testfarben von einem mittelgrauen Umfeld ( $L = 59 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ ). Eine Graukarte in der rechten Kammer dient als Vergleichsreiz und hilft bei der Skalierung des empfundenen Farbunterschiedes.



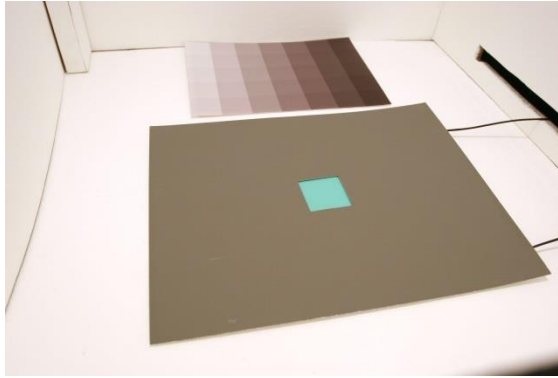


Abbildung 3.4: Einblick in die rechte Kammer

Die untersuchten Testfarben setzen sich aus zwei Gruppen zusammen, siehe Abbildung 3.5. 12 Farben stammen aus dem MacBeth ColorCheckerChart, ergänzt um fünf gesättigte Testfarben aus dem CQS-Farbkreis.

Alle Testfarben werden unter Angabe ihrer Munsell-Farbwerte und als DIN A4-große Proben bei einem Spezialversand bestellt ([farbkartenshop.de](http://farbkartenshop.de)). Um Irritationen durch Glanz auszuschließen wird eine matte Oberflächenqualität gewählt. Die Farbproben werden in je zwei A5-große Hälften geteilt, somit ist sichergestellt dass in linker und rechter Kammer identische Proben verwendet werden und keine Abweichungen aufgrund von Druckereinstellungen zu erwarten sind.

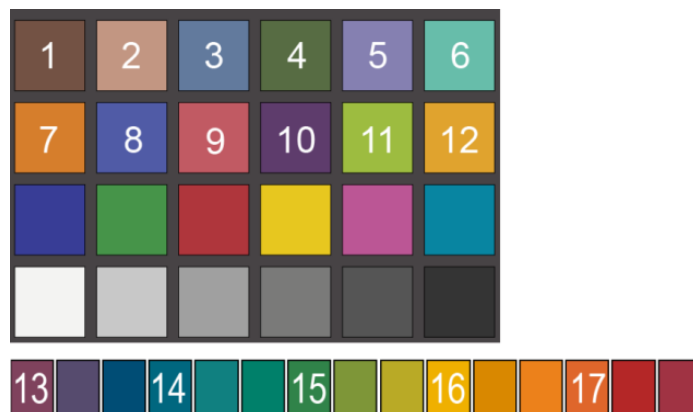


Abbildung 3.5: Ausgewählte Testfarben

Bei der Betrachtung der gemessenen spektralen Reflexionsgrade (Abbildung 3.6) sind die fünf CQS-Farben (Farben 13-17) durch steile Flanken erkennbar, in der Farbtabelle (Abbildung 3.7) durch weit außen liegende Farböberer.



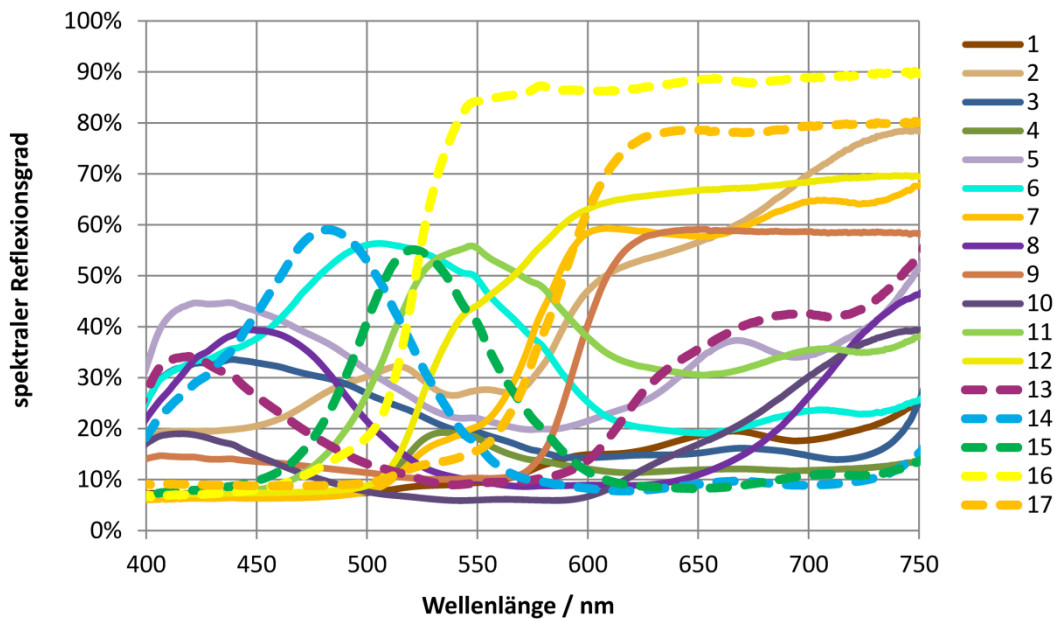


Abbildung 3.6: Spektrale Reflexionsgrade der Testfarben

Weiterhin fällt auf, dass die Reflexionsgrade aller Testfarben zu langen Wellenlängen ( $>730$  nm) hin ansteigen, und zwar unabhängig von der Bunttonerscheinung der Testfarbe. Diese Beobachtung steht im Einklang mit anderen Untersuchungen [119]. Für die steilflankigen, gesättigten Testfarben (9, 13-17) ist ein starker Wahrnehmungsunterschied zwischen der Beleuchtung mit Referenzlampe und ebenfalls steilflankigen RGB-LEDs zu erwarten, da große Flächenunterschiede unter den resultierenden spektralen Verläufen zu erwarten sind.

Mit resultierenden spektralen Verläufen ist hier die Faltung des spektralen Reflexionsgrades der Testfarbe mit dem Lichtquellenspektrum und einer Bewertungsfunktion ( $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$  oder  $L(\lambda), M(\lambda), S(\lambda)$ ) gemeint.

Abbildung 3.7 zeigt die Farbörter der 17 Testfarben in der  $a_c b_c$ -Ebene des CIECAM02-Modells. Für die Berechnung wurden folgende Parameter verwendet:

- Scene adapting luminance  $L_A = 306 \frac{cd}{m^2}$ , entspricht der gemessenen Leuchtdichte auf dem Weißstandard auf dem Boxboden;
- Scene average luminance  $Y_B = \frac{L_A}{5} = 61,2 \frac{cd}{m^2}$ ;
- $F = 1$ ,  $c = 0,69$  und  $N_c = 1$  (average).

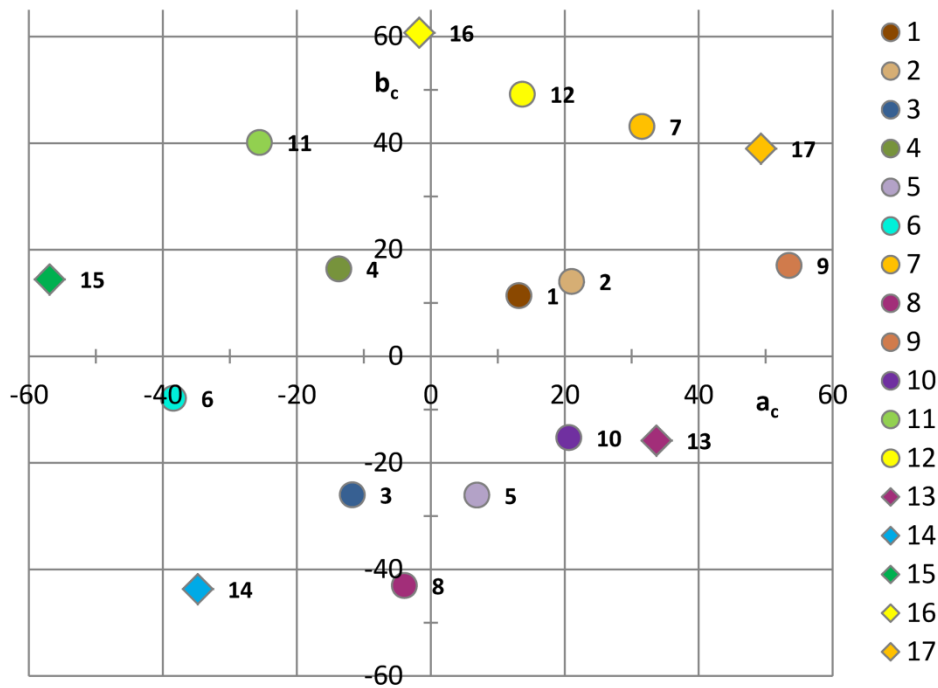


Abbildung 3.7: Farbörter der Testfarben unter Halogenglühlampen-Beleuchtung (CIECAM02-Farbebene)

Damit ergeben sich für das graue Umfeld (siehe Abbildung 3.4) Werte von  $J = 35$ ,  $a_c = -3$  und  $b_c = -2$ . Das Umfeld ist also nahezu unbunt, verfehlt aber den idealen Helligkeitswert für mittleres Grau von  $J = 50$ .

Insgesamt bestätigt die Messung die angestrebte gleichmäßige Verteilung der Testfarben.

### 3.1.3 Fragebogen

Der Fragebogen ist in mehrere Teile gegliedert.

- Eine grobe Einstufung der empfundenen Übereinstimmung in fünf Kategorien in Teil [1](#).
- Im Gegensatz dazu erfolgt die Bewertung in Teil [2](#) differenzierter mit Hilfe einer Intervallskala. Bei der Auswertung kann mit der Antwort in Teil [1](#) verglichen werden und Aussagen zur Kategorisierung abgeleitet werden, siehe Abschnitt 3.2 auf Seite 69.
- Numerische Angabe eines Farbunterschiedes in Teil [3](#). Im Gegensatz zu den übrigen Teilen wird hier die Graukarte als Referenz herangezogen. Durch die Verankerung der Bewertungen auf ein absolutes Niveau (Graukarte) wird eine Reduzierung der interpersonellen Streuungen in den Antworten erwartet, da sich hier jeder Proband auf die gleiche Referenz (Graukarte) bezieht. In Teil [1](#) und Teil [2](#) bezieht sich der Proband auf eine eigene innere Referenz.
- Genauere Unterteilung des wahrgenommenen Farbunterschiedes in Helligkeits-, Buntton- und Sättigungsverschiebungen (Abbildung 3.8 rechts unten). Diese visuellen Ergebnisse können detailliert mit Messwerten zu Helligkeit/Buntton/Sättigung in verschiedenen Farbräumen korreliert werden.



### 3.1.4 Graukarte

Als Vergleichsreiz für die Bewertung in Teil 3 des Fragebogens wird in der rechten Kammer (Referenzlichtquelle) zusätzlich zur Farbprobe eine Graukarte eingebracht, siehe Abbildung 3.4. Dadurch wird eine „Verankerung“ der individuellen Bewertungsskalen auf ein absolutes Niveau beabsichtigt. Ohne eine solche Verankerung besteht die Gefahr, dass die innere Skala, die jede Versuchsperson für die Bewertung heranzieht, von Person zu Person verschieden ist. Damit würden sich eine ungewollt große interpersonelle Streuung in den Bewertungen ergeben. Der Abschnitt „Graukarte“ ab Seite 71 beschäftigt sich weitergehend mit der interpersonellen Streuung.

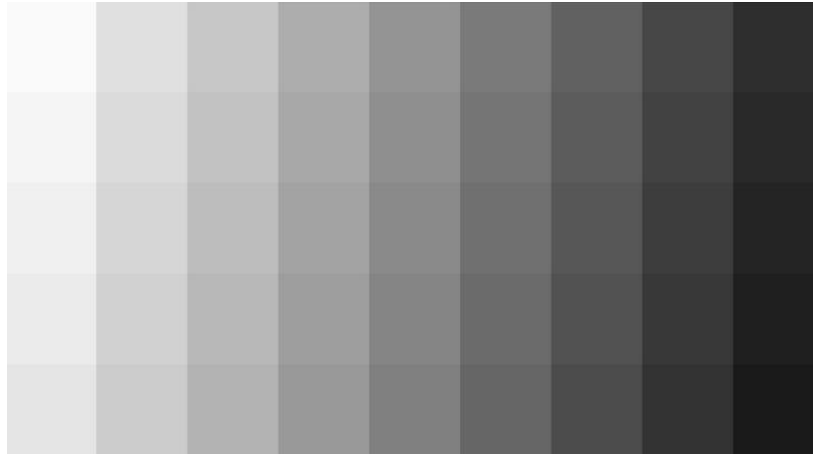


Abbildung 3.9: Graukarte

Die Graukarte wurde von der Fogra Forschungsgesellschaft Druck e. V. mit einem kalibrierten Proof-Drucker erstellt. Die Anordnung der Referenz-Graufelder auf einer zweidimensionalen Karte hatte sich in Vorexperimenten gegenüber der Verwendung einer großen Anzahl von Graupaaren als für Testpersonen leichter handhabbar erwiesen.

Der Proband hat die freie Wahl, welche Stelle auf der Graukarte er betrachtet. Daher muss die Graukarte folgende Anforderungen erfüllen:

1. Die Luminanzunterschiede zu den Nachbarfeldern sollen an jeder Stelle der Graukarte gleich groß sein (vertikal  $\Delta L^* \approx 2$ , horizontal  $\Delta L^* \approx 10$ ).
2. Alle Felder sollen unbunt sein ( $a^* = b^* = 0$ ).

Tabelle 3.3: Verteilung der CIELAB  $L^*$ -Werte (Sollwerte) auf der Graukarte

$L^*=98$	$L^*=88$	$L^*=78$	$L^*=68$	$L^*=58$	$L^*=48$	$L^*=38$	$L^*=28$	$L^*=18$
$L^*=96$	$L^*=86$	$L^*=76$	$L^*=66$	$L^*=56$	$L^*=46$	$L^*=36$	$L^*=26$	$L^*=16$
$L^*=94$	$L^*=84$	$L^*=74$	$L^*=64$	$L^*=54$	$L^*=44$	$L^*=34$	$L^*=24$	$L^*=14$
$L^*=92$	$L^*=82$	$L^*=72$	$L^*=62$	$L^*=52$	$L^*=42$	$L^*=32$	$L^*=22$	$L^*=12$
$L^*=90$	$L^*=80$	$L^*=70$	$L^*=60$	<b><math>L^*=50</math></b>	$L^*=40$	$L^*=30$	$L^*=20$	$L^*=10$

Zur Kontrolle wurden für einige Felder mit Hilfe des Konica Minolta CS-1000 Spektroradiometers  $J'a'b'$ -Werte im CIECAM02-UCS-Farbraum vermessen. Die Messung erfolgte nach Abschluss der Probandentests, also an der „abgenutzten“ Graukarte.

Für die Umrechnung in den CIECAM02-UCS-Farbraum wurden folgende Parameter benutzt:

- Scene adapting luminance  $L_A = 300 \frac{cd}{m^2}$ , das entspricht etwa der Umfeldleuchtdichte (Boden und Wände der rechten Kammer);
- Scene average luminance  $Y_B = \frac{L_A}{5} = 60 \frac{cd}{m^2}$ ;
- $F = 1$ ,  $c = 0,69$  und  $N_c = 1$  (average).

Tabelle 3.4: Farbwerte der stichprobenartig vermessenen Graukartenfelder (CIECAM02-UCS)

J'=87,1 a'=0,3 b'=-1,0			J'=58,3 a'=1,1 b'=0,1					
J'=85,3 a'=-0,3 b'=-0,4			J'=56,1 a'=0,9 b'=0,4			J'=27,1 a'=0,8 b'=0,4		
J'=83,7 a'=-0,2 b'=-1,5	J'=74,3 a'=0,4 b'=-0,8	J'=63,9 a'=0,1 b'=-0,4	J'=54,4 a'=1,5 b'=0,4	J'=44,2 a'=1,8 b'=1,4	J'=35,0 a'=0,6 b'=1,4	J'=25,5 a'=0,7 b'=0,5		
J'=81,6 a'=0,2 b'=-0,3			J'=52,1 a'=1,5 b'=0,4			J'=23,8 a'=1,3 b'=0,3		
J'=79,5 a'=0,1 b'=-0,5			J'=50,2 a'=1,9 b'=0,5					

Es zeigt sich, dass die zwei wichtigen Ziele erreicht wurden:

1. In allen Helligkeitsbereichen wurde eine gleichmäßige Stufung benachbarter Felder erreicht (vertikal  $\Delta J' \approx 2$ , horizontal  $\Delta J' \approx 10$ ).
2. Alle Graufelder sind unbunt ( $|a'|, |b'| \leq 1,8$ ).

Die gedruckte Graukarte entspricht damit voll den gestellten Anforderungen.

### 3.1.5 Versuchspersonen

Am Versuch nahmen 8 Personen teil. In der Altersstruktur dominiert der Bereich zwischen 20 und 30 Jahren. Im Anhang zeigt Tabelle B.2 auf Seite 170 eine Übersicht der Versuchspersonen. Die Testteilnehmer werden zunächst mit dem „Farnsworth Panel D-15“ [140] und dem „Lanthony Desaturated Panel D-15“ [141] Farblegetest auf Farbnormalsichtigkeit getestet. Nur farbnormalsichtige Personen werden für den Versuch akzeptiert. Vor der Durchführung des Versuches wird mit Hilfe von Anschauungsmaterial die Unterscheidung von Helligkeits-, Buntton- und Sättigungsunterschieden trainiert.

---

Zu Beginn des Versuches werden die Versuchspersonen gebeten für 10 Minuten in die rechte Kammer (Referenzlichtquelle) zu blicken. Der Kopf soll dabei so nah wie möglich an den Einblick der Kammer geführt werden, um einen möglichst großen Schwinkel bzw. eine gute Adaptation zu erreichen. Danach beginnt die Vergleichsphase, in der die Versuchsperson abwechselnd in rechte und linke Kammer blickt und abschließend ihr Urteil auf dem Fragenbogen abgibt. Auch hierbei soll der Kopf wieder möglichst dicht an der Box sein. Um ein Mindestmaß an Adaptation zu erzielen achtet der Versuchsleiter darauf, dass ein Wechsel der Kammer nur maximal alle zwei Sekunden stattfindet.



Abbildung 3.10: Farnsworth Panel D-15 (links) und Lanthony Desaturated Panel D-15 (rechts) Farblegetests

Insgesamt wurde der Versuch mit acht Personen durchgeführt ( $10 \text{ Lichtquellen} \cdot 17 \text{ Testfarben} = 170 \text{ Fragebögen pro Testperson} \cdot 8 \text{ Testpersonen} = 1360 \text{ Fragebögen insgesamt}$ ).

---

## 3.2 Auswertung der visuellen Bewertungen

---

Im folgenden Abschnitt wird eine Auswertung der visuellen Bewertungen vorgenommen, ohne zunächst den Bezug zu lichttechnischen Messwerten herzustellen.

### 3.2.1 Kategorisierte Bewertung

Beeinflusst die Art der Abfrage (Kategorien/Ordinalskala oder Intervallskala) die Antwort der Probanden, d. h. liefern Teil [1](#) und Teil [2](#) des Fragebogens vergleichbare Ergebnisse? Oder grafisch ausgedrückt: Wie gut lässt sich der Zusammenhang zwischen *Rating* (Teil [1](#)) und *Percent* (Teil [2](#)) durch eine Gerade annähern?

Wie Abbildung 3.11 zeigt, ist der Zusammenhang zwischen kategorisierter und kontinuierlicher Bewertung tatsächlich sehr linear ( $R^2 = 0,99$ ). Allerdings handelt es sich bei den fünf Datenpunkten um die gemittelten *Percent*-Werte, gemittelt über alle Versuchspersonen, Testfarben und Lichtquellen. Aussagekräftiger ist es, die Einzelwerte auf den 1360 ausgefüllten Fragebögen direkt miteinander zu vergleichen.

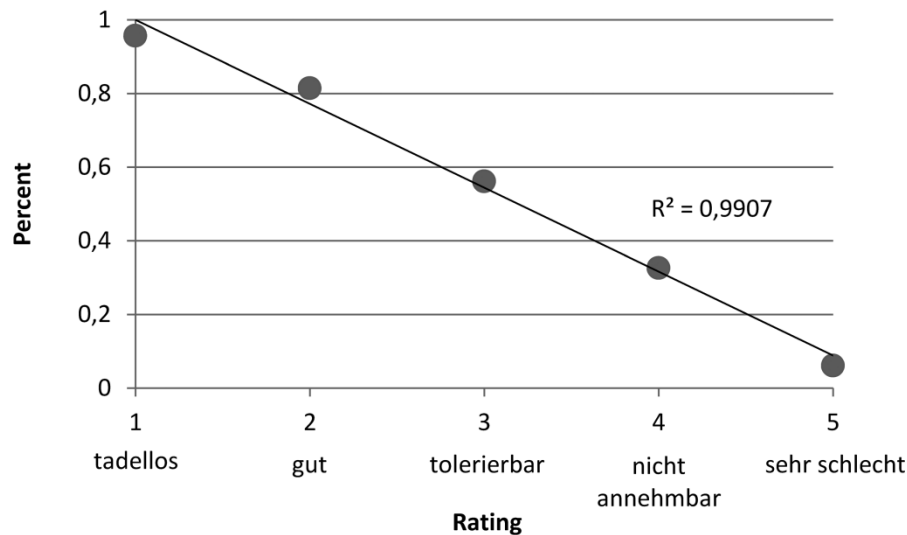


Abbildung 3.11: Fit einer Geraden an die mittleren *Percent*-Bewertungen in den fünf *Rating*-Kategorien

Wie linear ist der Zusammenhang zwischen jeder einzelnen *Rating*-Bewertung und der dazugehörigen *Percent*-Bewertung? Tabelle 3.5 enthält die Antwort: Mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,87$  korrelieren die Werte sehr gut, bei höchstem Signifikanzniveau ( $p < 0,001$ ). Oder, um die Eingangsfrage zu beantworten: Die Teile [1] und [2] des Fragebogens liefern vergleichbare Ergebnisse.

Tabelle 3.5: Vergleich der Fragebogenelemente untereinander (Korrelation  $r$  nach Pearson, Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , Signifikanz  $p$  und 2-seitiger T-Test)

Gruppe	Zusammenhang zwischen ...	$r$	$R^2$	$p$
Kategorisierte Bewertung	<i>Rating</i> [1] und <i>Percent</i> [2]	-0,93	0,87	0,0000
	<i>Rating</i> [1] und $\Delta E_{vis}$ [3]	0,66	0,44	0,0000
	<i>Rating</i> [1] und $\Delta E_{Detail}$	0,74	0,55	0,0000
Graukarten-verankerte Bewertung	$\Delta E_{vis}$ [3] und <i>Rating</i> [1]	0,66	0,44	0,0000
	$\Delta E_{vis}$ [3] und <i>Percent</i> [2]	-0,67	0,45	0,0000
	$\Delta E_{vis}$ [3] und $\Delta E_{Detail}$	0,72	0,51	0,0000
	<i>Percent</i> [2] und $\Delta E_{Detail}$	-0,75	0,56	0,0000

Mit den übrigen Elementen des Fragebogens zeigt sich für *Rating* [1] eine signifikante, aber weniger ausgeprägte Korrelation. Die geringste Übereinstimmung besteht mit  $R^2 = 0,44$  mit  $\Delta E_{vis}$  [3].

### 3.2.2 Graukarte

Führt die Verankerung mit Hilfe der Graukarte zu einer Verkleinerung der interpersonellen Streuung der Antworten, d. h. zeigen sich Unterschiede in den Antworten auf z. B. Teil [2] und Teil [3]?

Der Grundgedanke der Verankerung wird im Abschnitt „Graukarte“ ab Seite 67 erläutert. Tabelle 3.5 zeigt für  $\Delta E_{vis}$  [3] eine schlechtere Korrelation mit allen anderen Fragebogenelementen ( $R^2 \leq 0,51$ ) als alle anderen Elemente untereinander ( $R^2 \geq 0,55$ ). Offensichtlich führt die Verankerung zu einem geänderten Bewertungsverhalten der Versuchspersonen.

Tabelle 3.6: Interpersonelle Streuung ohne und mit Graukarte

	Fragebogen- Element	Standard- abweichung	Wertebereich	Standard- abweichung, normiert
ohne Graukarte	<i>Rating</i> [1]	0,755	1...5	0,189
	<i>Percent</i> [2]	0,186	0...1	0,186
	$\Delta E_{Detail}$	1,086	0...15,0	0,104
mit Graukarte	$\Delta E_{vis}$ [3]	1,837	0...10,4	0,122

Tabelle 3.6 zeigt die Standardabweichung der Einzelbewertungen der 8 Versuchspersonen, gemittelt über alle Testfarben und Lichtquellen ( $N = 170$ ). Die Normierung auf einen Wertebereich der Bewertungen zwischen 0 und 1 ermöglicht den direkten Vergleich der Werte. So finden beispielsweise die *Rating*-Bewertungen in einem Wertebereich zwischen 1 ( $\triangleq$  tadello) und 5 ( $\triangleq$  sehr schlecht) statt, die *Percent*-Bewertungen in einem Bereich zwischen 0 ( $\triangleq$  sehr schlecht) und 1 ( $\triangleq$  tadello). Durch die Normierung werden alle Wertebereiche auf 0...1 verschoben, die Standardabweichungen werden direkt vergleichbar. Im Fall von  $\Delta E_{vis}$  und  $\Delta E_{Detail}$  ist kein oberes Ende des Wertebereiches definiert, hier wird auf den Maximalwert normiert.

Im Vergleich der Teile [1], [2] und [3] des Fragebogens wird die normierte Standardabweichung durch den Einsatz der Graukarte von 0,189 bzw. 0,186 auf 0,122 gesenkt. Es ist also eine Senkung der interpersonellen Streuung in den visuellen Bewertungen durch den Einsatz der Graukarte feststellbar.

## 3.3 Testfarben

Für den Versuch werden insgesamt 17 Testfarben verwendet. Dabei soll die gesamte Farbtafel gleichmäßig abgedeckt werden. Interessant ist es nun, ob Unterschiede in der Bewertung verschiedener Farbgruppen zu beobachten sind, z. B. der Vergleich gesättigter und ungesättigter Testfarben.



Abbildung 3.12 zeigt die  $a_c b_c$ -Farbebene des CIECAM02-Farbraums mit den Messwerten der 17 Testfarben. Die Farben 1-12 stammen aus dem MacBeth ColorCheckerChart (MBCCC) und sind nahezu gleichmäßig in der Ebene verteilt. Die Nummern 13-17 sind der Palette der CQS-Testfarben entnommen und weisen eine hohe Sättigung auf, entsprechend weit vom Koordinatenursprung ( $\triangleq$  unbunt) entfernt befinden sich ihre Farbpörter.

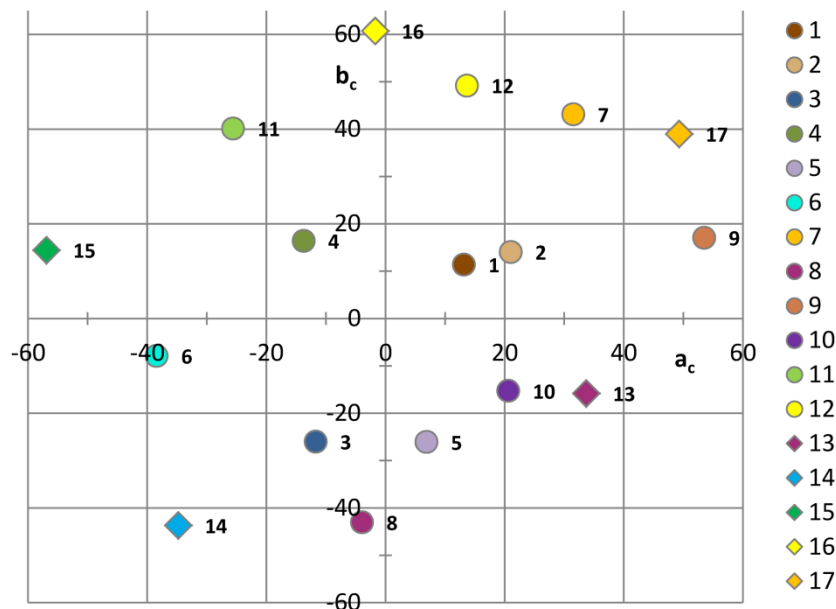


Abbildung 3.12: Lage der Testfarben in der CIECAM02-Farbebene

Entsprechend Tabelle 3.7 werden die Testfarben gruppiert. Quadrant 1 entspricht dabei positiven  $a_c$ - und positiven  $b_c$ -Werten, Quadrant 2 negativen  $a_c$ - und positiven  $b_c$ -Werten usw.

Tabelle 3.7: Zusammenfassung der Testfarben zu Gruppen

Unterscheidungs-merkmal	Gruppe	Testfarben
Sättigung	Ungesättigte Farben	1-12 MBCCC-Farben (siehe Abbildung 3.5 oberer Teil)
	Gesättigte Farben	13-17 CQS-Farben (siehe Abbildung 3.5 unterer Teil)
Buntton	Quadrant 1 Rot-Gelb	1, 2, 7, 9, 12, 17
	Quadrant 2 Gelb-Grün	4, 11, 15, 16
	Quadrant 3 Grün-Blau	3, 6, 8, 14
	Quadrant 4 Blau-Rot	5, 10, 13
	Hautton	1, 2

Beim Vergleich der ungesättigten mit den gesättigten Testfarben zeigt sich kein grundsätzlich unterschiedlicher Verlauf. In Abbildung 3.13 sind die visuellen Bewertungen  $\Delta E_{vis}$  über den gemessenen Farbdifferenzen  $\Delta E_{CIECAM02-UCS}$  dargestellt.

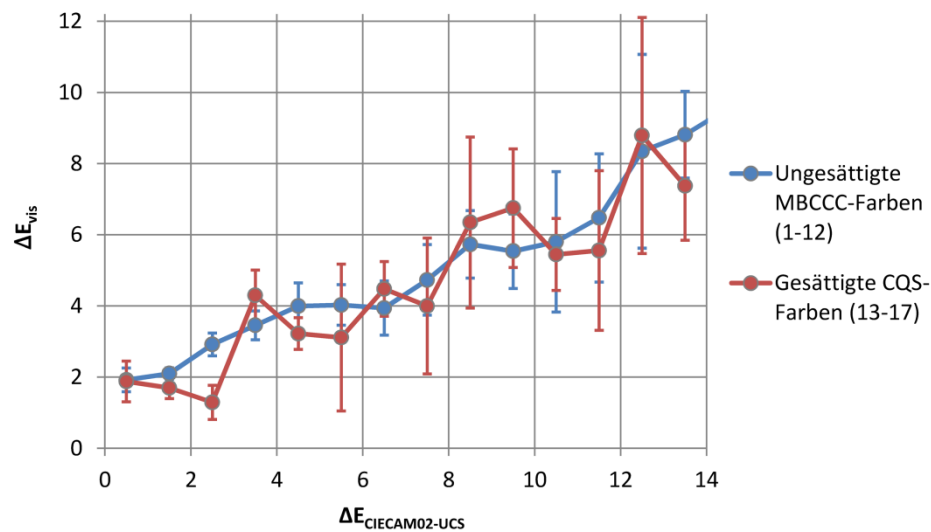


Abbildung 3.13: Vergleich der Bewertung ungesättigter und gesättigter Testfarben (Fehlerbalken: 95% Konfidenzintervall)

Die Konfidenzintervalle beider Gruppen überlappen sich bei den meisten Messpunkten stark, eine eindeutige Trennbarkeit scheint sehr unwahrscheinlich. Das Bestimmtheitsmaß zwischen beiden Gruppen beträgt  $R^2 = 0,90$ . Die Ergebnisse für ungesättigte und gesättigte Testfarben unterscheiden sich nicht signifikant ( $p < 0,0001$ ). Bei einigen Farbdifferenzwerten fällt für gesättigte Farben im Vergleich zu ungesättigten Farben eine größere Streuung unter den Testpersonen auf.

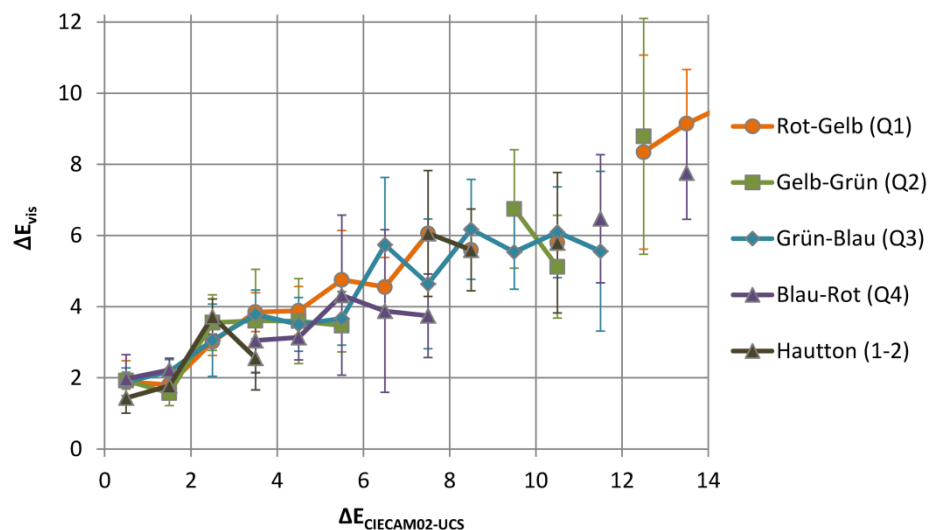


Abbildung 3.14: Vergleich der Buntton-Gruppen (Fehlerbalken: 95% Konfidenzintervall)

Beim Vergleich der Buntton-Gruppen (Abbildung 3.14) zeigt sich ein ähnliches Bild: Grundsätzlich gleichartiger Verlauf bei stark überlappenden Konfidenzintervallen. Bei detaillierter Betrachtung

gibt es Unterschiede (siehe Tabelle 3.8): Tendenziell korrelieren die Ergebnisse benachbarter Quadranten besser miteinander als die Ergebnisse gegenüberliegender Quadranten.

So ergeben sich zwischen Quadrant 1 (rot-gelber Bereich) und den in der Farbtafel benachbarten Quadranten 2 (Gelb-Grün) und 4 (Blau-Rot) Bestimmtheitsmaße von  $R^2 = 0,93$  bzw.  $R^2 = 0,95$ , zwischen Quadrant 1 und dem gegenüberliegenden Quadrant 3 (grün-blauer Bereich) aber nur  $R^2 = 0,77$ . Eine Ausnahme bildet Quadrant 4 (Blau-Rot), der zum Nachbarquadranten 3 (Grün-Blau) mit  $R^2 = 0,64$  ein ähnliches Korrelationsniveau zeigt wie zum gegenüberliegenden Quadranten 2 (Gelb-Grün,  $R^2 = 0,62$ ). Möglicherweise steht dieses Ergebnis im Zusammenhang mit der geringen Anzahl an Testfarben in Quadrant 4, während alle anderen Quadranten mehr Testfarben enthalten. Die Anzahl der Bewertungen für die 3 Testfarben in Quadrant 4 beträgt  $N = 240$  (alle 10 Lichtquellen und 8 Testpersonen), während sie für die 6 Testfarben in Quadrant 1  $N = 480$  beträgt.

Idealerweise sollte der Farbraum CIECAM02-UCS visuell gleichabständig sein und keine Verzerrungen aufweisen. Farbunterschiedsbewertungen sollten unabhängig vom Buntton möglich sein. Die Ergebnisse zeigen, dass dies funktioniert – weder der Buntton im CIECAM02-UCS-Farbraum noch die Unterscheidung zwischen gesättigten/ungesättigten Farben zeigen einen Einfluss auf die visuelle Bewertung.

Tabelle 3.8: Übereinstimmung der Farbgruppen (Bestimmtheitsmaß  $R^2$ )

	Rot-Gelb	Gelb-Grün	Grün-Blau	Blau-Rot	Hautton
Rot-Gelb	1	0,93	0,77	0,95	0,91
Gelb-Grün	0,93	1	0,84	0,62	0,87
Grün-Blau	0,77	0,84	1	0,64	0,80
Blau-Rot	0,95	0,62	0,64	1	0,86
Hautton	0,91	0,87	0,80	0,86	1

Alle Ergebnisse in Tabelle 3.8 befinden sich auf sehr hohem Signifikanzniveau ( $p \leq 0,0001$ ). Die Zusammenhänge sind signifikant, aber nicht unbedingt linear.

Als zusätzliche Gruppe wurden die zwei Hauttöne des MBCCC (#1 dark skin, #2 light skin) isoliert. Auch hier zeigen sich für die in der Farbtafel benachbarten Farbgruppen (Gelb-Grün, Blau-Rot) höhere Korrelationswerte als für entfernte Farben (Grün-Blau). Am höchsten ist die Korrelation erwartungsgemäß mit Farben des Rot-Gelb-Bereiches, in dem auch beide Hautton-Farbörter zu finden sind.

Zusammenfassend scheint die Wahl der Testfarben eine untergeordnete Rolle zu spielen. Eine gleichmäßige Verteilung der Testfarben über alle vier Quadranten der Farbtafel erscheint sinnvoll.

---

### 3.4 Geeigneter Farbraum

---

Von Interesse ist der Zusammenhang zwischen visuellen Antworten, insbesondere mit den Graukarten-verankerten  $\Delta E_{vis}$ -Ergebnissen (siehe Fragebogen Abbildung 3.8), und berechneten Farbdifferenzen. Auf der Seite der berechneten Farbdifferenzen werden aus den Spektralradiometer-Messwerten  $\Delta E$ -Werte berechnet, jeweils gemittelt über alle Testpersonen.

Die zugrunde liegenden Farbräume bzw. Farbtafeln sind folgende:

- CIE xy-Farbtafel (1931)
- CIE  $u'v'$ -Farbtafel (1976)
- CIELAB ( $a^*$ ,  $b^*$ ; 1976)

Zusätzlich die im CIECAM02-Farb Wahrnehmungsmodell enthaltenen Farbräume:

- CIECAM02 ( $a_c$ ,  $b_c$ ) [142]
- CIECAM02-LCD ( $a'$ ,  $b'$ ) [27]
- CIECAM02-SCD ( $a'$ ,  $b'$ ) [27]
- CIECAM02-UCS ( $a'$ ,  $b'$ ) [27]

Um eine Vergleichbarkeit von Farbtafeln und Farbräumen herzustellen, werden Helligkeitsdimensionen der Farbräume (z. B.  $L^*$  in CIELAB) für die Berechnung der Farbdifferenzen nicht berücksichtigt (d. h.  $\Delta L^* = 0$ ). Dem liegt die These zugrunde, dass die visuellen Urteile ohne Berücksichtigung von Helligkeitsänderungen – nur auf Basis von Farbänderungen – gefällt wurden.

Die berechneten Farbdifferenzen werden den visuellen Antworten *Rating*, *Percent*,  $\Delta E_{vis}$  und  $\Delta E_{Detail}$  (siehe Abschnitt 3.1 Fragebogen) gegenüber gestellt, die ebenfalls über alle Testpersonen gemittelt werden. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten nach Pearson zeigt **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke..** Es zeigt sich, dass neben der  $u'v'$ -Farbtafel die modifizierten CIECAM02-Farbräume (LCD, SCD, UCS) am besten mit den visuellen Daten korrelieren.

Um den Einfluss Testperson-individueller Skalierungen auf den visuellen Mittelwert zu reduzieren, wird im Folgenden die Z-Transformation angewendet. Das Ziel dieser Operation ist es, den Mittelwert und die Standardabweichung der Antworten einer Testperson an den Gesamtmittelwert (bzw. die Gesamt-Standardabweichung) anzugleichen. Dadurch werden individuelle Tendenzen wie generell schlechte Bewertung oder geringe Streubreite der Antwortwerte gemildert. Erst nach diesem Berechnungsschritt werden dann die Mittelwerte über alle Testpersonen gebildet.

Für *Rating* (bzw. *Rating\_Z*) und *Percent* ergeben sich durch die Z-Transformation keine Änderungen, für  $\Delta E_{vis}$  und  $\Delta E_{Detail}$  nur vernachlässigbar geringe Veränderungen. Dies zeigt, dass interpersonelle Streuungen für die Korrelation von visuellen Antworten und berechneten Farbdifferenzen keine Rolle spielen.

Tabelle 3.9: Korrelationskoeffizienten  $r$  (nach Pearson) zwischen visuellen Antworten und berechneten Farbdifferenzen

	<i>Rating</i> <span>1</span>	<i>Percent</i> <span>2</span>	$\Delta E_{vis}$ <span>3</span>	$\Delta E_{Detail}$
$\Delta xy$	0,77	-0,79	0,82	0,79
$\Delta u'v'$	0,82	-0,84	0,91	0,87
CIELAB $\Delta E_{a^*b^*}$	0,69	-0,73	0,78	0,77
CIECAM02 $\Delta E_{a_c b_c}$	0,78	-0,81	0,86	0,84
CIECAM02-LCD $\Delta E_{a'b'}$	0,79	-0,83	0,87	0,85
CIECAM02-SCD $\Delta E_{a'b'}$	0,81	-0,84	0,87	0,83
CIECAM02-UCS $\Delta E_{a'b'}$	0,81	-0,84	0,88	0,84

Eine These kann bestätigt werden: Die „Verankerung“ der visuellen Werte mit Hilfe von Referenzreizen (Graukarte) führt zu einer besseren Korrelation mit berechneten Farbdifferenzen – die Korrelationskoeffizienten für  $\Delta E_{vis}$  weisen höhere Beträge auf als diejenigen für *Rating*, *Percent* und  $\Delta E_{Detail}$ . Das gilt für alle Farbräume.

Tabelle 3.10: Korrelationskoeffizienten  $r$  zwischen z-transformierten visuellen Antworten und berechneten Farbdifferenzen

	<i>Rating_Z</i> <span>1</span>	<i>Percent_Z</i> <span>2</span>	$\Delta E_{vis\_Z}$ <span>3</span>	$\Delta E_{Detail\_Z}$
$\Delta xy$	0,77	-0,79	0,82	0,79
$\Delta u'v'$	0,82	-0,84	0,90	0,87
CIELAB $\Delta E_{a^*b^*}$	0,69	-0,73	0,79	0,77
CIECAM02 $\Delta E_{a_c b_c}$	0,78	-0,81	0,87	0,85
CIECAM02-LCD $\Delta E_{a'b'}$	0,79	-0,83	0,88	0,85
CIECAM02-SCD $\Delta E_{a'b'}$	0,81	-0,84	0,87	0,83
CIECAM02-UCS $\Delta E_{a'b'}$	0,81	-0,84	0,88	0,84

In Tabelle 3.10 wird deutlich, dass sich die visuellen Ergebnisse  $\Delta E_{vis\_Z}$  am besten mit der  $u'v'$ -Farbtafel oder den CIECAM02-Varianten -LCD, -SCD oder -UCS vorhersagen lassen. Die  $u'v'$ -Farbtafel kann für den zukünftigen Einsatz nicht empfohlen werden. Zum einen stellt sie keinen vollwertigen Farbraum dar – es fehlt die Helligkeitsdimension. Zum anderen bietet ein Farbwahrnehmungsmodell wie CIECAM02 weitere Vorteile wie Berücksichtigung von Sehbedingungen und integrierte chromatische Adaptation. Aus Gründen der Vereinfachung sollte CIECAM02-UCS als Farbraum gewählt werden. Damit entfällt eine bei der Anwendung sonst notwendige Unterscheidung in große (LCD) und kleine Farbdifferenzen (SCD).

### 3.5 Farbtemperatur (CCT)

Der Versuch wurde zum einen im warmweißen Farbtemperaturbereich (CCT ca. 2700 K) durchgeführt, zum anderen aber auch mit neutralweißen Lichtquellen wiederholt (CCT ca. 4500 K). Damit können interessante Fragen beantwortet werden:

- Gibt es einen Einfluss der Farbtemperatur auf die visuelle Farbdifferenzwahrnehmung?
- Funktionieren die Formeln zur chromatischen Adaptation im CIECAM02-Modell, d. h. wird der Einfluss der Farbtemperatur korrekt berechnet?
- Hat der Farbwiedergabeindex  $R_a$  der Testlichtquelle einen Einfluss auf die visuelle Farbwahrnehmung? → Abschnitt 3.6

Für die Auswertung werden die visuellen Bewertungen *Rating* und  $\Delta E_{vis}$  herangezogen. Details dazu sind in Abschnitt 3.1 ab Seite 65 zu finden. Alle Werte werden Z-transformiert, d. h. alle Werte einer Testperson werden auf ihren Mittelwert und Standardabweichung normalisiert um den individuellen Einfluss der Testperson auf das Gesamtergebnis zu minimieren.

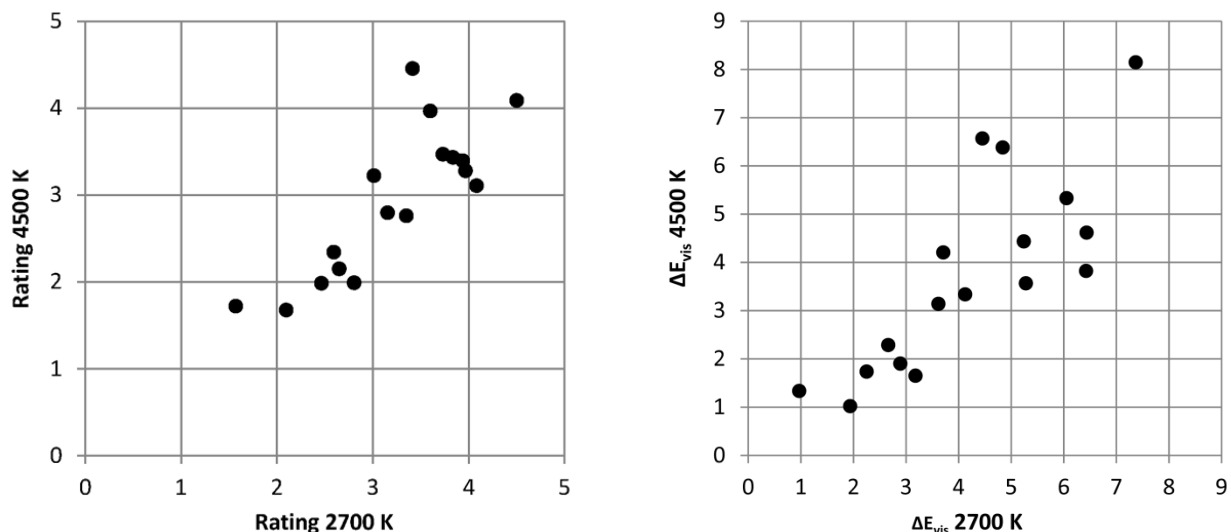


Abbildung 3.15: Vergleich der visuellen Bewertungen *Rating* (links) und  $\Delta E_{vis}$  (rechts) für 2700 K und 4500 K; Zuordnung durch gleiche  $\Delta u'v'$ -Werte

In Abbildung 3.15 sind die visuellen Bewertungen für beide Farbtemperaturen gegeneinander aufgetragen. Ein Punkt in den Diagrammen repräsentiert die visuellen Bewertungen in einem bestimmten  $\Delta u'v'$ -Intervall, die Intervallgröße beträgt 0,002. Ohne diese Gruppenbildung ist es schwierig die Bewertungen bei beiden Farbtemperaturen zueinander zuzuordnen. Die Intervallgröße beeinflusst die Anzahl der Werte beider Farbtemperaturen, die einander zugeordnet werden können (Anzahl der Punkte in Abbildung 3.15). Sehr große Intervalle führen zu wenigen Gruppen und verfälschten Korrelationsmaßen, mit sehr kleinen Intervallen finden viele Werte einer Farbtemperatur keine Entsprechung der anderen Farbtemperatur (d. h. es trat im Versuch kein Reiz der zweiten Farbtemperatur in diesem  $\Delta u'v'$ - bzw.  $\Delta E$ -Intervall auf). Ein Optimum scheint diesbezüglich die Intervallgröße von  $\Delta u'v' = 0,002$  bzw.  $\Delta E = 0,2$  (für CIELAB und CIECAM02) zu sein, dieser Wert wird für die Auswertung verwendet.

Für *Rating* ergibt sich  $R^2 = 0,74$  auf hoch signifikantem Niveau ( $p < 0,001$ ), für  $\Delta E_{vis}$  noch leicht besser  $R^2 = 0,76$  ( $p < 0,001$ ). Der Zusammenhang zwischen den visuellen Bewertungen beider Farbtemperaturen ist also von sehr guter Linearität bei hoher Signifikanz. Bei Zuordnung beider Farbtemperaturen auf Basis gleicher CIELAB- $\Delta E$ -Werte ergibt sich zwischen *Rating* (2700 K) und *Rating* (4500 K) ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,02$  ( $p = 0,52$ ), für  $\Delta E_{vis}$   $R^2 = 0,27$  ( $p = 0,034$ ) – für *Rating* kein signifikanter Zusammenhang beider Farbtemperaturen, für  $\Delta E_{vis}$  eine schwache Korrelation mit Signifikanz auf dem 4%-Niveau. Das heißt für den CIELAB-Farbraum zeigt sich eine schlechte Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Warmweiß und Neutralweiß. Offensichtlich funktioniert die chromatische Adaptation des CIELAB-Modells nicht sehr gut.

Das Bild ändert sich wenn statt CIELAB nun CIECAM02-UCS verwendet wird. Für beide visuelle Bewertungen ergeben sich nun  $R^2 = 0,42$  und  $p = 0,0048$  (*Rating*) bzw.  $R^2 = 0,63$  und  $p < 0,001$  ( $\Delta E_{vis}$ ). Warm- und neutralweiße  $\Delta E_{vis}$ -Antworten korrelieren in hohem Maße und auf bestem Signifikanzniveau.

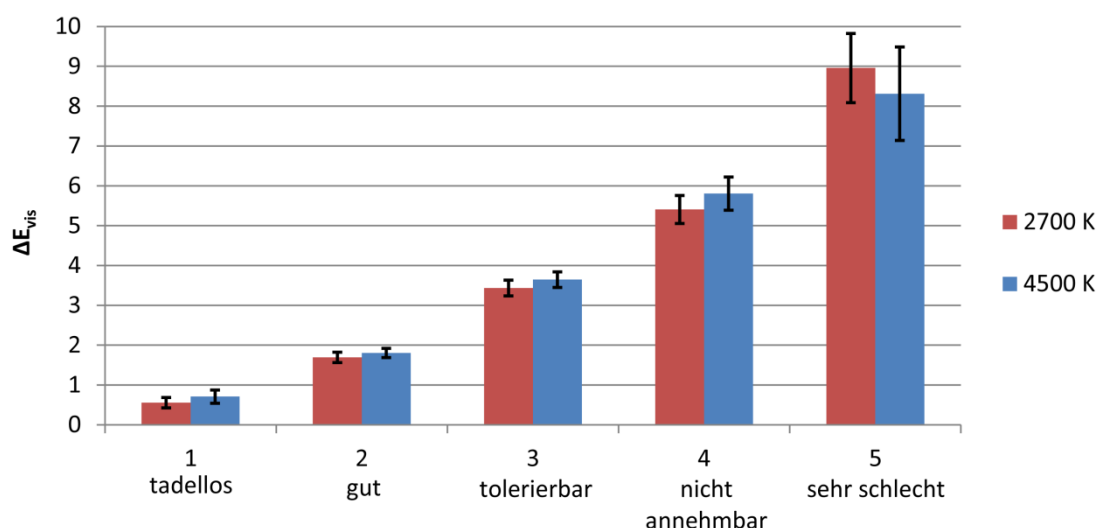


Abbildung 3.16: Zusammenhang zwischen visuellen Bewertungen *Rating* und  $\Delta E_{vis}$  für beide Farbtemperaturen

Ein Einfluss der Farbtemperatur auf den Zusammenhang zwischen visuellen und farbmtrischen Werten ist praktisch nicht mehr vorhanden. Offensichtlich sind die Formeln zur Berechnung der chromatischen Adaptation im CIECAM02-Modell besser als die Implementierung im CIELAB-Modell.

Die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen auf Basis der  $u'v'$ -Farbtafel ist dabei nur bedingt gegeben. Zum einen beeinflusst die Wahl der Intervallgröße das Ergebnis – entspricht ein  $\Delta u'v' = 0,002$  einem  $\Delta E = 0,2$  im CIELAB- oder CIECAM02-UCS-Farbraum? Es ist jedenfalls die beste Näherung. Zum zweiten ist  $u'v'$  eine Farbtafel – im Gegensatz zu den beiden Farbräumen fehlt hier die Helligkeitsdimension. Im Anhang sind ab Seite 141 die Diagramme für alle drei Farbräume (bzw. Farbtafeln) enthalten.

In Abbildung 3.16 wird die mittlere visuelle Bewertung  $\Delta E_{vis}$  in den fünf *Rating*-Kategorien dargestellt. Die Fehlerbalken (95%-Konfidenzintervalle) für 2700 K und 4500 K überlappen sich in starkem Maße, d. h. beide Farbtemperaturen lassen sich nicht eindeutig voneinander unterscheiden

( $R^2 = 0,99$ ;  $p < 0,001$ ). Die visuelle Bewertung wird also nicht signifikant von der Farbtemperatur der verwendeten Lichtquellen beeinflusst.

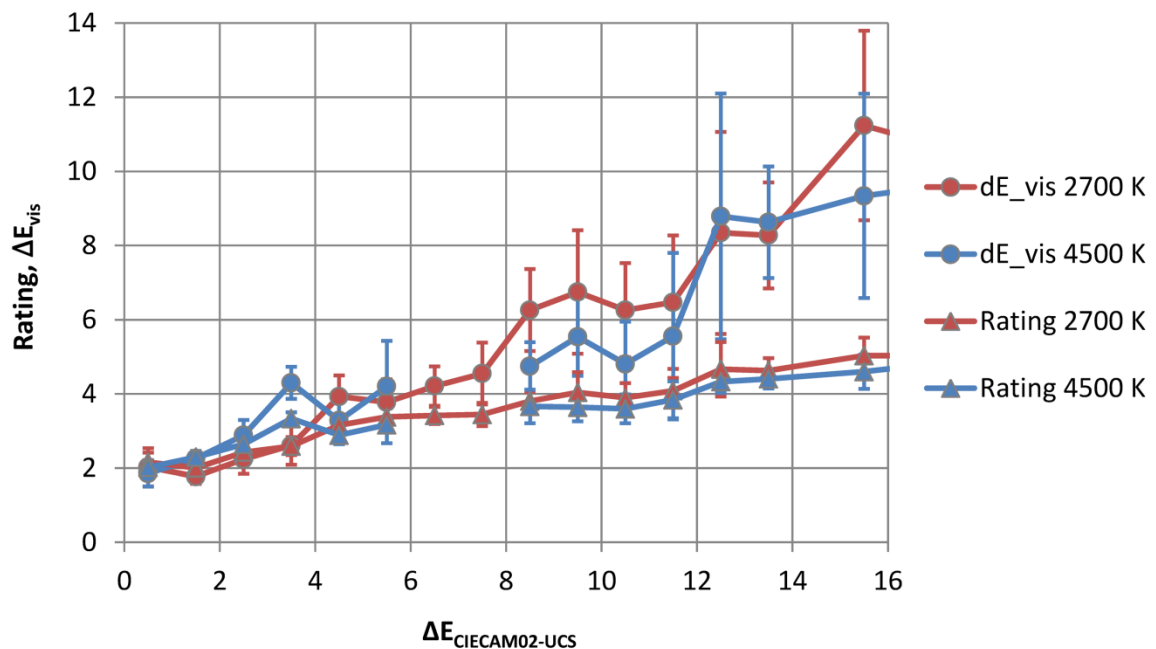


Abbildung 3.17: Visuelle Werte *Rating* und  $\Delta E_{\text{vis}}$  im Zusammenhang mit CIECAM02-UCS-Farbdifferenz

Abbildung 3.17 schließlich zeigt den Zusammenhang zwischen berechneter Farbdifferenz  $\Delta E_{\text{CIECAM02-UCS}}$  und visueller Bewertung *Rating* (Dreiecke) bzw.  $\Delta E_{\text{vis}}$  (runde Punkte) für beide Farbtemperaturen (rot 2700 K, blau 4500 K). Erkennbar ist auch hier, dass sich die Konfidenzintervalle für beide Farbtemperaturen sehr stark überlappen, d. h. eine Trennung nach Farbtemperatur nicht möglich ist.

### 3.6 Farbwiedergabeindex $R_a$

Um den Einfluss der Farbwiedergabefähigkeiten der Lichtquelle auf die visuelle Bewertung der Farbproben zu untersuchen werden die Testlichtquellen in drei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe enthält Lichtquellen mit sehr guten Farbwiedergabeindizes ( $R_a$  mindestens 90), die zweite mit mittleren Werten zwischen 64 und 69 und die dritte schließlich die RGB-LED-Mischungen mit sehr geringen Indexwerten von maximal 22.



Tabelle 3.11: Einteilung der Testlichtquellen in  $R_a$ -Gruppen

Gruppe	Lichtquelle	Beschreibung	$R_a$	CCT [K]
hoch $90 \leq R_a$	HC3L	Weißer LED	97	2798
	HC3N	Weißer LED	95	4869
	FL927	Leuchtstofflampe 930 mit Farbfiltren	90	2641
	FL945	Leuchtstofflampe 954 mit Farbfiltren	92	4391
mittel $60 < R_a < 70$	C3L	Weißer LED	67	2640
	C3N	Weißer LED	69	4579
	FL627	Leuchtstofflampe 640 mit Farbfiltren	64	2786
	FL645	Leuchtstofflampe 640 mit Farbfiltren	69	4423
gering $R_a < 30$	RGB27	RGB-LED	17	2690
	RGB45	RGB-LED	22	4438

Abbildung 3.18 zeigt die mittlere visuelle Bewertung  $\Delta E_{vis}$  in den fünf *Rating*-Kategorien. Zusätzlich sind am oberen Rand die Anzahl der Bewertungen notiert, die zum abgebildeten Mittelwert und Konfidenzintervall führen. Für die Gruppe  $R_a \geq 90$  wurde keine Bewertung in der *Rating*-Kategorie 5 (sehr schlecht) abgegeben, deshalb fehlt der rote Balken für diese Kategorie.

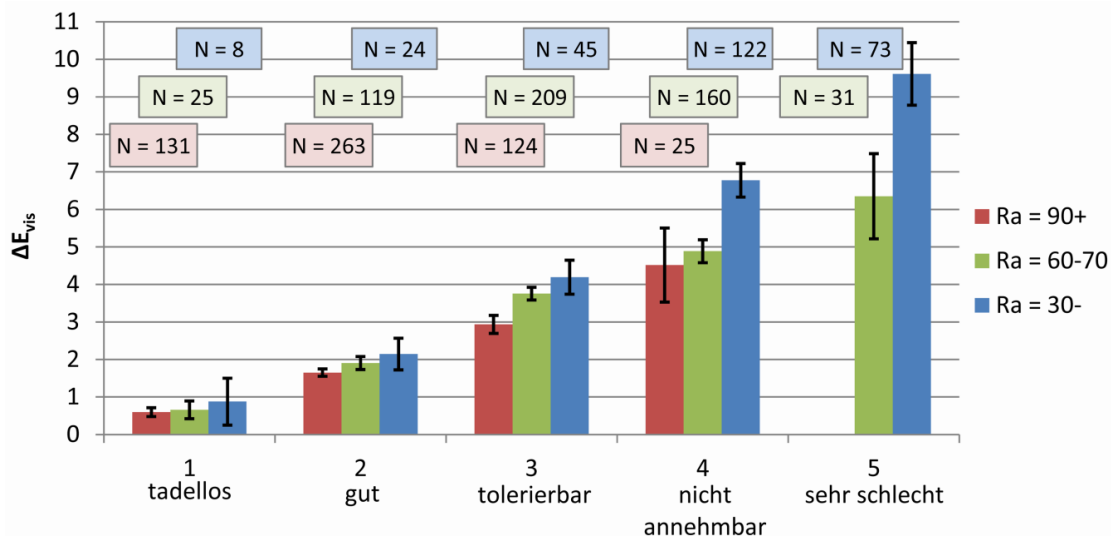


Abbildung 3.18: Abhängigkeit der visuellen Bewertung von der Farbwiedergabegruppe

In den Kategorien 1 (tadellos) und 2 (gut), teilweise auch in den Kategorien 3 (tolerierbar) und 4 (nicht annehmbar), tritt eine starke Überlappung der Fehlerbalken (95%-Konfidenzintervalle) auf. Die Werte für die Gruppen  $R_a \geq 90$  (rot) und  $60 < R_a < 70$  (grün) zeigen eine signifikante hohe Korrelation ( $R^2 = 0,90$ ;  $p = 0,015$ ), die Gruppen  $60 < R_a < 70$  (grün) und  $R_a < 30$  (blau) eine sehr signifikante, sehr hohe Korrelation ( $R^2 = 0,97$ ;  $p = 0,002$ ). Das bedeutet, dass der Zusammenhang zwischen beiden visuellen Bewertungen insgesamt nicht vom Farbwiedergabeindex der Testlichtquelle beeinflusst wird.

Abbildung 3.19 zeigt für die drei Gruppen die visuelle Bewertung *Rating* im Zusammenhang mit den berechneten Farbdifferenzen  $\Delta E_{\text{CIECAM02-UCS}}$ . Die Bewertungen für die hohe Gruppe (rot,  $R_a \geq 90$ ) und die mittlere Gruppe (grün,  $60 < R_a < 70$ ) korrelieren schlecht ( $R^2 = 0,55$ ), im Diagramm weisen die Fehlerbalken (95%-Konfidenzintervalle) keine Überlappungen auf – die Lichtquellen beider Gruppen führen bei gleichem gemessenem  $\Delta E$  zu unterschiedlichen *Rating*-Bewertungen.

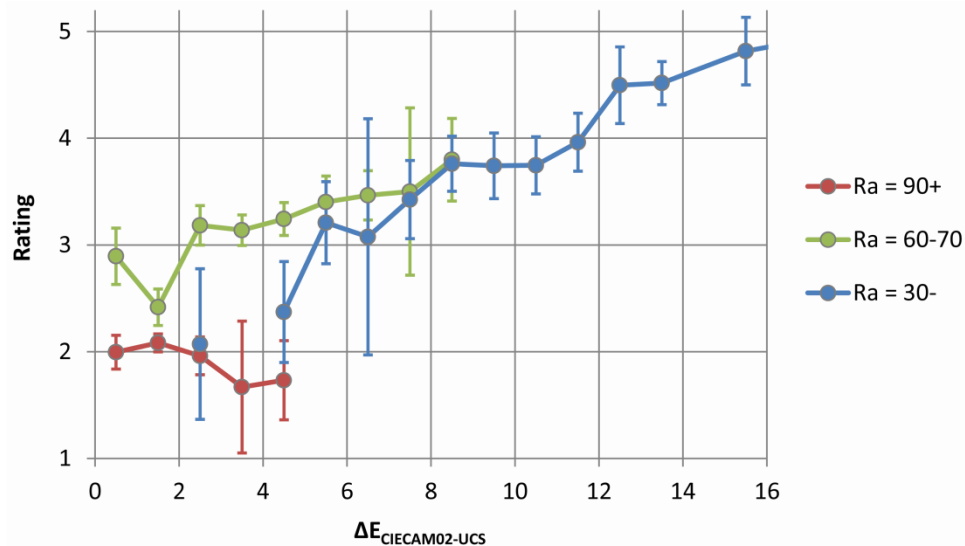


Abbildung 3.19: Visuelles *Rating* (1 = tadellos, ..., 5 = sehr schlecht) für die Farbwiedergabegruppen, aufgetragen über der Farbdifferenz

Die Bewertungen der mittleren und der unteren Gruppe (blau,  $R_a < 30$ ) korrelieren deutlich besser ( $R^2 = 0,87$ ;  $p = 0,0069$ ), auch im Diagramm sind bei einigen Datenpunkten deutliche Überlappungen der Fehlerbalken erkennbar. Bei Farbdifferenzen von  $\Delta E > 5$  lässt sich kein Unterschied mehr zwischen beiden Gruppen ausmachen.

Tabelle 3.12: Korrelation zwischen den *Rating*-Bewertungen der Farbwiedergabegruppen (Bestimmungsmaß  $R^2$ )

$R_a$ -Gruppe	CIECAM02-SCD	CIECAM02-UCS	CIECAM02-LCD
hoch - mittel	0,46	0,55	0,65
mittel - gering	0,43	0,87	0,63

Interessant ist auch die Korrelation der *Rating*-Bewertungen bei Gruppierung in den drei Varianten SCD, LCD und UCS des CIECAM02-Farbraumes. Der für kleine Farbdifferenzen optimierte SCD-Farbraum sollte erwartungsgemäß das größte Bestimmungsmaß zwischen den  $R_a$ -Gruppen „hoch“ und „mittel“ liefern, da hier tendenziell kleine Farbdifferenzen auftreten. Erstaunlicherweise wird diese Erwartung nicht erfüllt, UCS und LCD liefern bessere Korrelationen. Auf der anderen Seite sollte die LCD-Variante die besten Werte zwischen den  $R_a$ -Gruppen „mittel“ und „gering“ liefern, denn hier treten große Farbdifferenzen auf. Tabelle 3.12 zeigt aber, dass UCS die beste Korrelation

zeigt ( $R^2 = 0,87$ ;  $p = 0,0069$ ) während LCD ein schlechteres Bestimmungsmaß bei schlechterem Signifikanzniveau liefert ( $R^2 = 0,63$ ;  $p = 0,033$ ).

Wenn statt der kategorisierten Bewertung *Rating* die Graukarten-verankerte kontinuierliche  $\Delta E_{vis}$ -Bewertung betrachtet wird (Tabelle 4.1), dann ändert sich das Bild. Nun zeigt erwartungsgemäß SCD die höchste Korrelation zwischen hoher und mittlerer  $R_a$ -Gruppe ( $R^2 = 0,88$ ) und LCD die beste Korrelation zwischen mittlerer und geringer Gruppe ( $R^2 = 0,62$ ;  $p = 0,036$ ). UCS siedelt sich wie erwartet im Mittelfeld zwischen den beiden Extremen SCD und LCD an.

Tabelle 3.13: Korrelation zwischen den  $\Delta E_{vis}$ -Bewertungen der Farbwiedergabegruppen (Bestimmungsmaß  $R^2$ )

$R_a$ -Gruppe	CIECAM02-SCD	CIECAM02-UCS	CIECAM02-LCD
hoch - mittel	0,88	0,47	0,38
mittel - gering	0,36	0,55	0,62

Auch in der grafischen Darstellung (Abbildung 3.20) ändern sich die Werte kaum: Hohe und mittlere Gruppe  $R^2 = 0,47$ , mittlere und untere Gruppe  $R^2 = 0,55$  ( $p = 0,089$ ). Wohlgermerkt: Diese Zahlenwerte beschreiben die Korrelation unter den visuellen Bewertungen der einzelnen  $R_a$ -Gruppen und nicht die Beziehung zwischen visueller Bewertung und den berechneten Farbdifferenzen  $\Delta E_{CIECAM02-UCS}$ .

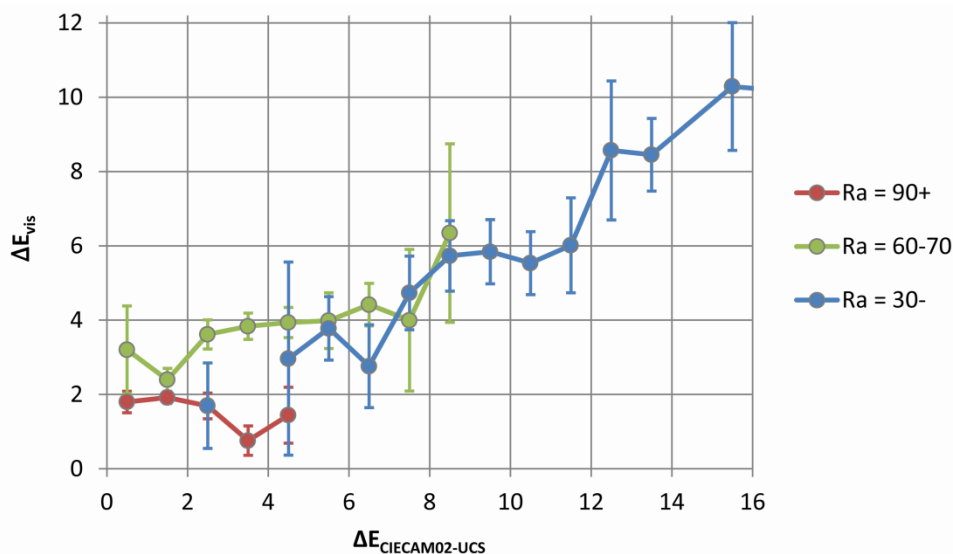


Abbildung 3.20: Visuelles  $\Delta E_{vis}$  für die Farbwiedergabegruppen, aufgetragen über der Farbdifferenz

Hat der Farbwiedergabeindex der Testlichtquelle einen Einfluss auf die visuelle Bewertung? Natürlich ja, mit steigendem  $R_a$  werden erwartungsgemäß die Bewertungen tendenziell besser. Eine Lichtquelle mit hohem Indexwert sollte – gemittelt über alle Testfarben – kleine Farbunterschiede und gute visuelle Bewertungen erzielen. Sollte das nicht so sein, muss die Berechnung des Farbwiedergabeindex hinterfragt werden. In Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 werden somit steigende Funktionen erwartet. Das ist für die beiden Gruppen mit mittleren und niedrigen  $R_a$ -

---

Werten (grün bzw. blau) auch der Fall, für die Gruppe der hohen Werte (rot) nicht. Hier werden Schwierigkeiten bei der reproduzierbaren visuellen Bewertung von kleinen Farbunterschieden vermutet. Ebenso ist aber auch die messtechnische Erfassung und weitere Verrechnung zu Farbdifferenzen eine Herausforderung. Leichte Fehler in der Messgeometrie oder in der niederen Farbmatrik (Normspektralwertfunktionen) können hier Auswirkungen zeigen [59].

Außerdem fällt in Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 auf, dass im Bereich von  $\Delta E_{CIECAM02-UCS} \approx 4$  starke Unterschiede in der Bewertung der Farbwiedergabegruppen bestehen. Lichtquellen der hohen Gruppe ( $R_a \geq 90$ , rot) werden – im Mittel über alle Testfarben – deutlich besser bewertet als Lichtquellen der mittleren Gruppe ( $60 < R_a < 70$ , grün). Offensichtlich neigen die Versuchspersonen dazu, eine einmal als schlecht empfundene Lichtquelle auch bei allen folgenden Testfarben tendenziell schlecht zu bewerten. Im Versuchsablauf wurden alle Testfarben für eine Lichtquelle direkt nacheinander gezeigt und erst dann auf die nächste Lichtquelle umgeschaltet. Möglicherweise kann ein häufigerer Wechsel der Lichtquellen in zukünftigen Versuchen diesen Effekt mildern.

---

## 4 Ergänzender Versuch zu semantischen Kategorien

Mit einem gesonderten Versuch sollen Worte bzw. Begriffe für empfundene Farbdifferenzen gefunden werden. Kann beispielsweise beim Vergleich zweier Farbproben von einer „guten“ oder „sehr guten“ Übereinstimmung gesprochen werden? Wie weit sind „gut“ und „sehr gut“ auf einer Skala von 0 bis 100 voneinander entfernt? Wären „schlecht“ und „sehr schlecht“ genauso weit voneinander entfernt?

Solche Bewertungen sind abhängig vom Kontext, in dem die Versuchsperson sie vornimmt. Daher wurden die Versuchspersonen für alle nachfolgend beschriebenen Versuche mit einer „Rahmengeschichte“ vertraut gemacht. Dafür wurde die farbliche Erscheinung eines anspruchsvollen Gemäldes unter zwei Lichtquellen gewählt. Die Versuchspersonen wurden angewiesen, mögliche Abweichungen zwischen Original und Reproduktion sehr kritisch zu bewerten.

---

### 4.1 Versuchsziele

---

Zwei Ziele werden angestrebt:

6. Es sollen intuitiv verständliche Begriffe für die wahrgenommene Größe von Farbdifferenzen gefunden werden. Im normalen Sprachgebrauch unübliche und deshalb nicht intuitiv verständliche Bezeichnungen sollen identifiziert und aussortiert werden.
7. Die gefundenen Begriffe sollen auf einer Intervallskala mit den Endpunkten „0“ und „100“ angeordnet werden. Damit können den Begriffen Zahlenwerte zwischen 0 und 100 zugeordnet werden.

Der Versuch wird in deutscher Sprache durchgeführt, die Übertragung in andere Sprachräume zählt nicht zu den Zielen des Versuches.

---

### 4.2 Fragebogen und Versuchspersonen

---

Die Versuchsteilnehmer sollen den Grad der Übereinstimmung zweier Farbproben bewerten. Dabei werden im Versuch aber keine Farbproben eingesetzt, die Versuchsperson erhält lediglich ein A4-großen Fragebogen (siehe auch Anhang 0 „Ergänzende Versuche zu semantischen Kategorien“ auf Seite 172) und wird in einem einführenden Gespräch mit dem Kontext vertraut gemacht.

Die Versuchsperson bringt zunächst die 10 angebotenen Begriffe auf der linken Seite in eine Reihenfolge. Im ausgefüllten Fragebogen ist die Zuordnung zu aufsteigenden Nummern erkennbar (gut = 4, sehr schlecht = 10 usw.). Die angebotenen 10 Begriffe werden auf dem Fragebogen in einer randomisierten Reihenfolge dargeboten. Im zweiten Schritt werden die Positionen der Begriffe

auf der Intervallskala festgelegt. Die Versuchspersonen markiert die entsprechende Position mit einem Kreuz oder Strich auf der Skala rechts.

Für die Auswertung werden manuell mit einem Lineal die Entfernungen zum Fußpunkt der Skala vermessen. Im Beispiel wurden für „gut“ 11,0 cm ermittelt. Die Gesamtlänge der Skala beträgt 15,0 cm. Abschließend werden die Entfernungen in Werte zwischen 0 und 100 umgerechnet. Abbildungen des leeren und beispielhaft ausgefüllten Fragebogens finden sich auch im Anhang ab Seite 172.

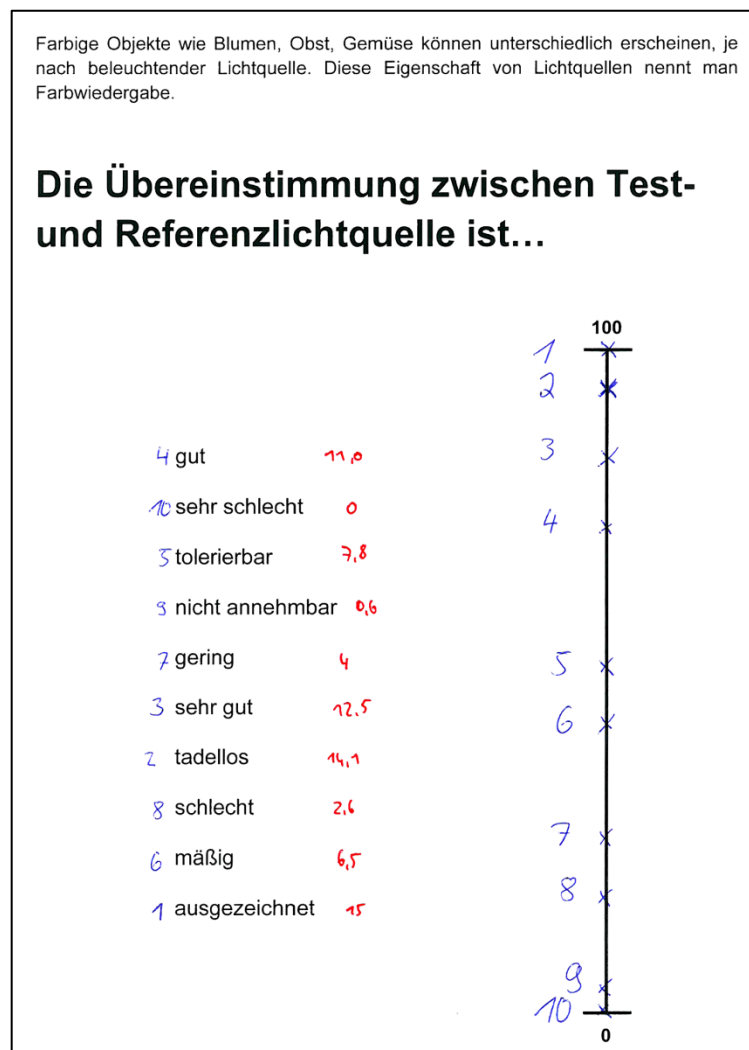


Abbildung 4.1: Beispiel eines ausgefüllten Fragebogens

An dem Versuch haben 46 Personen teilgenommen, es handelte sich dabei um Teilnehmer der Jahrestagung der Association Internationale de la Couleur (AIC) im Juni 2011 in Zürich sowie im Mitarbeiter und Studenten der TU Darmstadt.

### 4.3 Auswertung

Tabelle 4.1 zeigt die Mittelwerte und 95% Konfidenzintervalle aller 10 Begriffe, sortiert nach den Mittelwerten. Dieselben Daten zeigt auch Abbildung 4.2.

Tabelle 4.1: Auswertung aller 10 Begriffe

Begriff	Mittelwert	95% Konf.
ausgezeichnet	97,9	1,1
tadellos	94,8	2,7
sehr gut	91,6	2,1
gut	79,6	2,3
tolerierbar	60,0	4,1
mäßig	52,9	3,5
gering	41,2	3,5
schlecht	26,5	3,1
nicht annehmbar	19,8	5,5
sehr schlecht	12,8	3,1

Zwei Punkte fallen auf:

1. Es gibt Überlappungen zwischen den Konfidenzintervallen benachbarter Begriffe. Das betrifft folgende Begriffe:
  - a. tadellos und ausgezeichnet
  - b. tadellos und sehr gut
  - c. tolerierbar und mäßig
  - d. nicht annehmbar und schlecht
  - e. nicht annehmbar und sehr schlecht
2. Die größten Konfidenzintervalle weisen die Begriffe nicht annehmbar und tolerierbar auf.

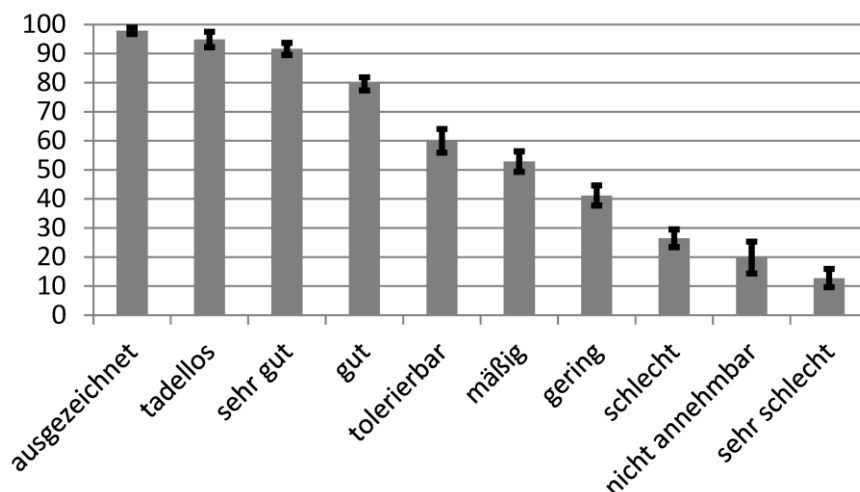


Abbildung 4.2: Auswertung aller 10 Begriffe

Eine von mehreren Versuchspersonen übereinstimmend geäußerte Anmerkung betrifft die Begriffe nicht annehmbar und tolerierbar: Die Teilnehmer verstehen unter „nicht annehmbar“ weniger einen Punkt auf der Skala, sondern vielmehr den gesamten Bereich unterhalb des markierten Punktes. Ähnlich wird auch „tolerierbar“ aufgefasst. Auch darunter wird ein (teilweise recht großer) Bereich verstanden. Auf dem Fragebogen wurde in diesem Fall ein mittlerer Wert markiert. Es verwundert daher nicht, dass diese beiden Begriffe große Konfidenzintervalle aufweisen.

## Auswertung von 7 ausgewählten Begriffen

Durch die Überlappung von Konfidenzintervallen lassen sich auf dem gewählten 95%-Niveau einige Skalenwerte nicht eindeutig einem Begriff zuordnen. Das wird durch die Entfernung von drei Begriffen geändert: „Tadellos“, „tolerierbar“ und „nicht annehmbar“. Tabelle 4.2 und Abbildung 4.3 zeigen die Werte der verbleibenden Begriffe.

Tabelle 4.2: Auswertung der 7 ausgewählten Begriffe

Begriff	Mittelwert	95% Konf.
ausgezeichnet	97,9	1,1
sehr gut	91,6	2,1
gut	79,6	2,3
mäßig	52,9	3,5
gering	41,2	3,5
schlecht	26,5	3,1
sehr schlecht	12,8	3,1

Nun ist es möglich, beispielsweise dem Begriff „gut“ einen Wert von 79,6 zuzuweisen, oder auch in umgekehrter Richtung, dem Wert 50 den Begriff „mäßig“ zuzuordnen.

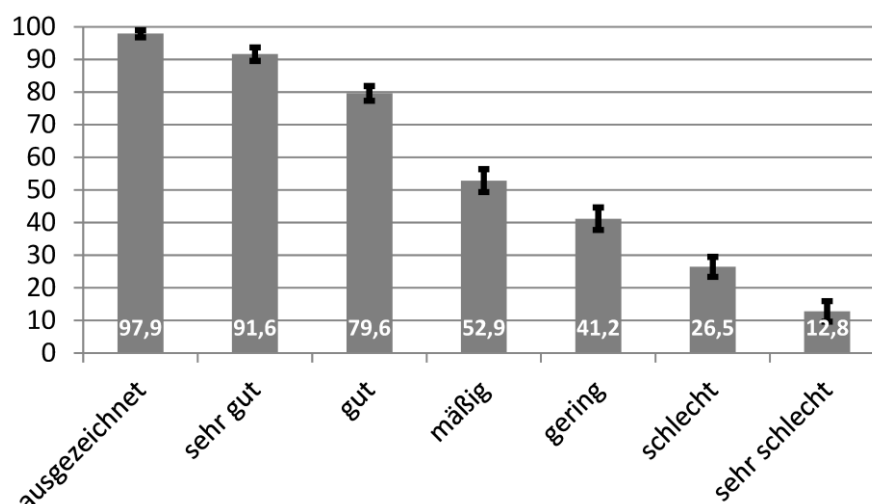


Abbildung 4.3: Auswertung der 7 ausgewählten Begriffe (jeweils Mittelwert und 95% Konfidenzintervall)



## 4.4 Kategoriegrenzen

Für die Zuordnung von Werten zu Kategorie-Begriffen ist es sinnvoll, eindeutige Grenzwerte zwischen zwei Kategorien festzulegen.

$$Grenze = \frac{(Mittelwert_{\text{oberhalb}} - Konf_{\text{oberhalb}}) + (Mittelwert_{\text{unterhalb}} + Konf_{\text{unterhalb}})}{2} \quad \text{Formel 4.1}$$

Der Einfachheit halber werden die Grenzen „auf halbem Weg“ zwischen dem unteren Ende des Konfidenzintervalls der Kategorie oberhalb der Grenze und dem oberen Ende des Intervalls der darunterliegenden Kategorie gezogen. Die Grenze zwischen „ausgezeichnet“ und „sehr gut“ berechnet sich beispielsweise zu  $\frac{96,8+93,7}{2} = 95,2$ . Tabelle 4.3 fasst alle Werte zusammen.

Tabelle 4.3: Werte für die Übereinstimmung zweier Farbproben

Kategorie	Mittelwert	Mittelwert ± 95% Konfidenzintervall	Grenze
		98,9	
<b>ausgezeichnet</b>	97,9		
		96,8	
			95,2
		93,7	
<b>sehr gut</b>	91,6		
		89,5	
			85,7
		81,9	
<b>gut</b>	79,6		
		77,3	
			66,8
		56,4	
<b>mäßig</b>	52,9		
		49,3	
			47,0
		44,6	
<b>gering</b>	41,2		
		37,7	
			33,6
		29,5	
<b>schlecht</b>	26,5		
		23,4	
			19,6
		15,9	
<b>sehr schlecht</b>	12,8		
		9,6	

---

## 5 Tabletop-Versuch

Nachdem die semantische Einteilung einer Intervallskala zur Bewertung von Farbdifferenzen durch den Vorversuch zur Benennung der Kategorien bekannt ist, folgt nun der Hauptversuch. Ziel des Versuches ist es, eine Zuordnung von gemessenen  $\Delta E$ -Werten zu wahrgenommenen kategorisierten Farbunterschieden zu finden. Damit wird es möglich, die Größe eines visuell wahrgenommenen Farbunterschiedes künftig durch vermessene  $\Delta E$ -Werte vorauszuberechnen.

Derartige Versuche wurden schon in der Vergangenheit durchgeführt und publiziert [14, 15, 19, 23, 27, 29, 30, 32, 33, 37, 38, 40, 42, 47, 52, 58, 143-156]; allerdings wurde bisher die visuelle Wahrnehmung nicht in Kategorien („sehr gut“, „gut“, „schlecht“ usw.) erfasst.

---

### 5.1 Aufbau und Durchführung

---

Nach den Erfahrungen mit der Zweikammer-Box wurde den Testpersonen in diesem Versuch eine stärker an realen Beobachtungsbedingungen ausgerichtete Umgebung zur Verfügung gestellt.

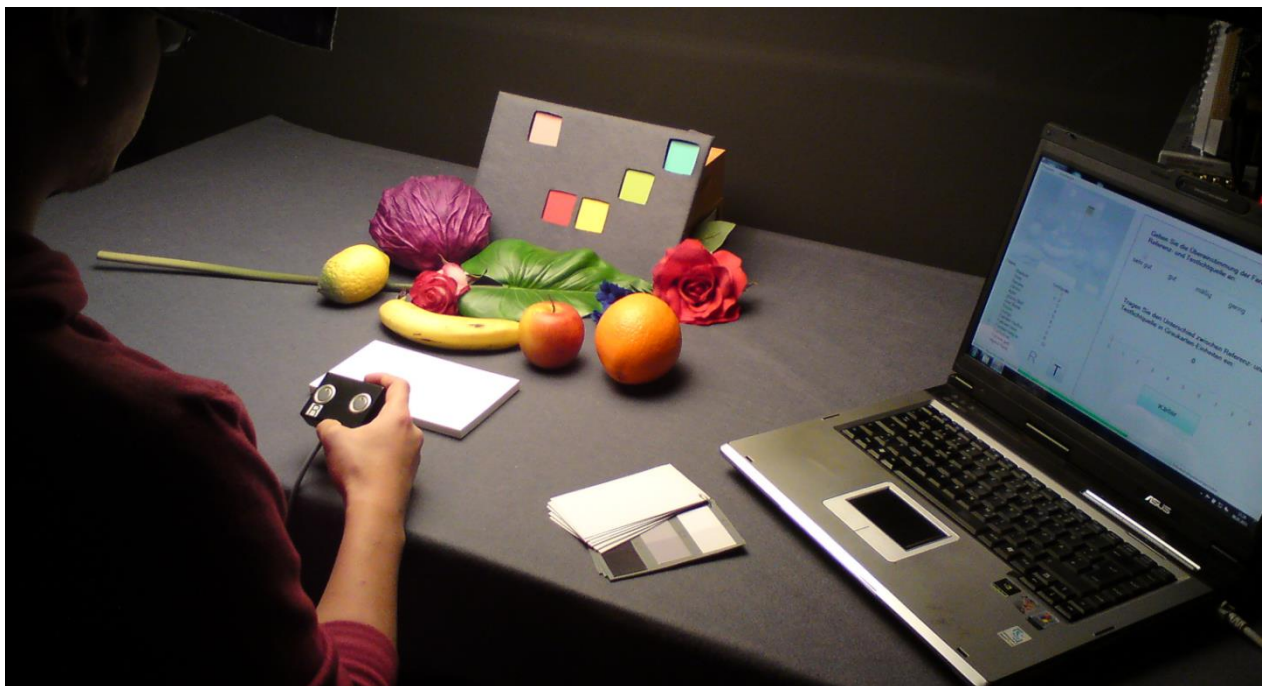


Abbildung 5.1: Tabletop-Versuch

Statt einem Boxaufbau mit kleinen Einblick-Öffnungen wird ein Tisch verwendet. Die zu bewertenden Objekte sind größtenteils dreidimensionale natürliche und künstliche Alltagsgegenstände wie Blumen, Obst und Gemüse anstatt von einfarbigen gedruckten Farbfeldern.

## 5.1.1 Testobjekte

Zur Wahl stehen sowohl natürliche Objekte wie Lebensmittel, Blumen usw. als auch Objekte, die künstliche Farbpigmente enthalten und daher ein anderes spektrales Reflexionsverhalten aufweisen. Tabelle 5.1 führt Vor- und Nachteile künstlicher und natürlicher Objekte auf.

Tabelle 5.1: Vor- und Nachteile der verschiedenen Objektarten

	Vorteile	Nachteile
<b>Künstliche Objekte</b>	Konstanz in der Farberscheinung, jede Testperson sieht den identischen Farbreiz	Künstliche Pigmente, spektrale Reflexion kann sich von natürlichen Pigmenten unterscheiden
<b>Natürliche Objekte</b>	spektrale Reflexion „echter“ natürlicher Pigmente	leicht verderblich, die Testpersonen beurteilen nicht alle den identischen Farbreiz
<b>Farbfelder</b>	konstante Farberscheinung ohne Textur	nur matte Fläche, fehlende Oberflächeneigenschaften (z. B. Textur, Glanz)

Es sollen sowohl natürliche als auch künstliche Objekte getestet werden. Zusätzlich sollen gedruckte einfarbige Felder aus dem MacBeth Color Checker Chart (MBCCC) verwendet werden. Auf diese Weise kann in der Auswertung gezeigt werden, ob z. B. Unterschiede in der Bewertung eines gelben natürlichen Objektes, eines gelben künstlichen Objektes und eines gelben Farbfeldes vorhanden sind. Es werden 14 Testobjekte ausgewählt, davon 6 künstliche, 3 natürliche Objekte und 5 Farbfelder.

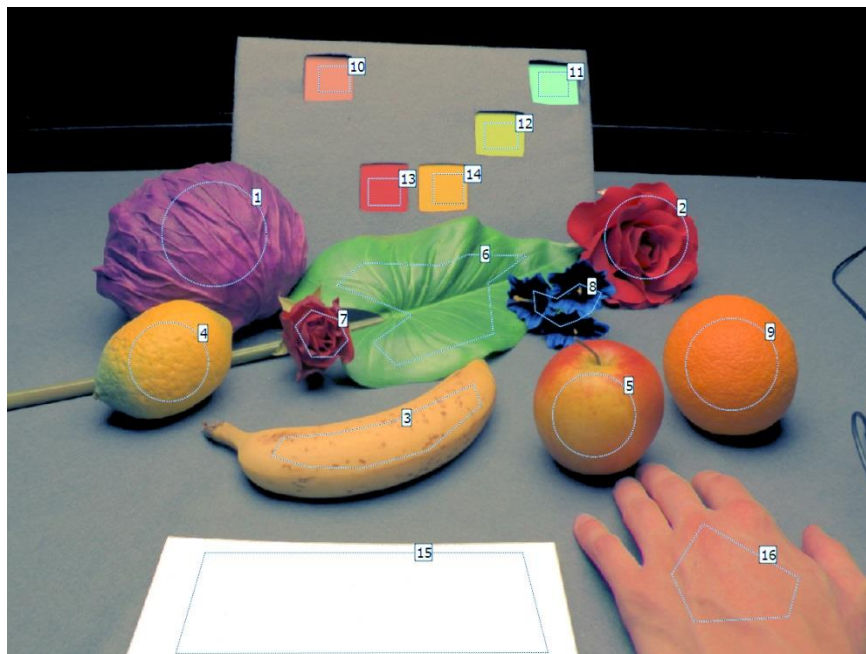


Abbildung 5.2: Testobjekte aus Sicht der Versuchsperson

Abbildung 5.2 zeigt ein Bild der Technoteam LMK 98/4 Kamera. Sie wird bei jedem Testdurchlauf einmalig an die Augenposition der Testperson gebracht und nimmt ein High Dynamic Range (HDR-) Bild mit Filtern für die Normfarbwerte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  auf. Für die Auswertung werden die Normfarbwerte für den CIE 1964 10°-Beobachter  $X_{10}$ ,  $Y_{10}$  und  $Z_{10}$  aus Messdaten eines Konica Minolta CS1000 Spektroradiometers ermittelt und die Farbdifferenz zwischen Referenz- und jeweiliger Testlichtart für jedes Objekt berechnet.

Während des Versuches liegen immer alle Objekte auf dem Tisch. So wird sichergestellt, dass jede Testperson die Objekte aus (nahezu) dem gleichen Blickwinkel und unter gleichen Beleuchtungsbedingungen (Schattenwurf) betrachtet. Beim Weg- und Hinlegen von Objekten wäre diese Konstanz nicht gegeben.

Tabelle 5.2: Übersicht der ausgewählten Testobjekte

	Reihenfolge im Test	Name	Farbe	
<b>Künstliche Objekte</b>	2	Rose	rot	
	5	Apfel	rot-grün	
	4	Zitrone	gelb	
	6	Blatt	grün	
	8	Enzian	blau	
	1	Rotkraut	violett	
<b>Natürliche Objekte</b>	7	Rose	rosa	
	9	Orange	orange	
	3	Banane	gelb	Vergleich mit künstlichem gelbem Objekt (Zitrone) und gelbem Farbfeld
<b>Farbfelder (MBCCC)</b>	13	Feld #15	rot	Vergleich mit künstlichem roten Objekt (Rose)
	10	Feld #2	Hautton	Vergleich mit natürlichem Hautton (eigene Hand)
	14	Feld #16	gelb	Vergleich mit künstlichem und natürlichem gelben Objekt (Zitrone, Banane)
	12	Feld #11	hellgrün	Vergleich mit künstlichem grünen Objekt (Blatt)
	11	Feld #6	türkis	Vervollständigung des Farbkreises

In Abbildung 5.2 ist auch ein weiteres Objekt auf dem Tisch zu erkennen: Der Weißstandard (Region Nr. 15). Diese Platte aus ca. 1 cm dickem PTFE-Material verbleibt wie die anderen Objekte

bei allen Versuchen konstant am selben Ort. Sie unterstützt einerseits die chromatische Adaptation der Versuchsperson auf die jeweils eingestellte Lichtquelle, dient zum zweiten aber auch im Sinne eines Weißstandards der farbmtrischen Vermessung der Lichtquellen. So kann die Konstanz von Leuchtdichte und Farbart über den gesamten Versuchszeitraum (mehrere Wochen) protokolliert werden. Eine Auswertung dieser Daten ist in [Anhang](#) ab Seite 142 enthalten. Die ebenfalls in der Abbildung erkennbare Hand wurde in der ursprünglichen Versuchsplanung als zusätzliches Objekt vorgesehen, in der endgültigen Versuchsdurchführung und -auswertung jedoch nicht mehr berücksichtigt.

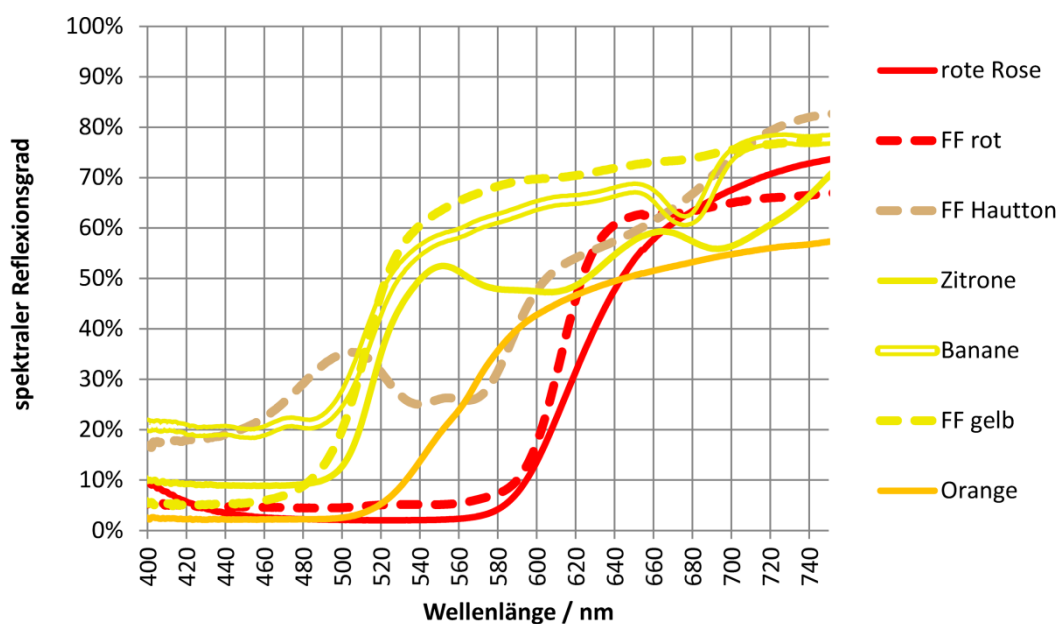


Abbildung 5.3: Spektrale Reflexionsgrade der Testobjekte (Teil 1)

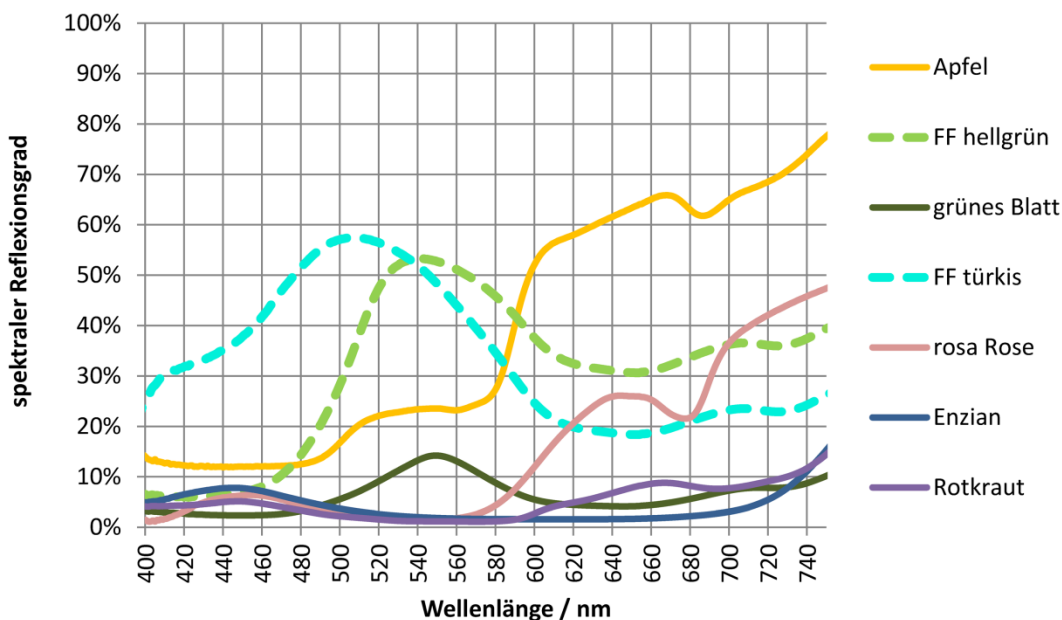


Abbildung 5.4: Spektrale Reflexionsgrade der Testobjekte (Teil 2)

Die spektralen Reflexionsgrade wurden mit einem Spektroradiometer Konica Minolta CS1000 vermessen. Dieses Gerät arbeitet mit einem relativ kleinen Messfleck, so dass auf jedem Objekt eine charakteristische Stelle für die Vermessung ausgewählt wurde. Die natürlichen Objekte werden in den Wochen der Versuche mehrmals ausgetauscht und weisen daher entsprechende Schwankungen auf. Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 zeigen die resultierenden spektralen Verläufe als Momentaufnahme und nicht gemittelt über den gesamten Testzeitraum.

Testobjekte wie rote Rose, Zitrone und Banane zeigen steile Flanken – hier sind starke Änderungen der Farberscheinung bei der Beleuchtung mit RGB-LEDs zu erwarten. Die Orange weist einen starken spektralen Kontrast auf – während sie Wellenlängen oberhalb von 600 nm relativ gut reflektiert, absorbiert sie Strahlung unterhalb von 520 nm fast vollständig. Auch hier werden starke Farbveränderungen beim Umschalten von Halogenglühlampe (kontinuierliches Spektrum) auf RGB-LED-Mischungen (diskontinuierlich) erwartet. Im Vergleich der künstlichen Zitrone mit der natürlichen Banane und dem gelben Farbfeld fällt auf, dass sich die Reflexionsspektren kaum unterscheiden. Die Flanke befindet sich bei allen drei gelben Objekten bei ca. 520 nm und weist eine vergleichbare Steigung auf. In der visuellen Bewertung werden daher keine signifikanten Unterschiede erwartet. Eine solche Ähnlichkeit weisen auch die natürliche rote Rose und das rote Farbfeld.

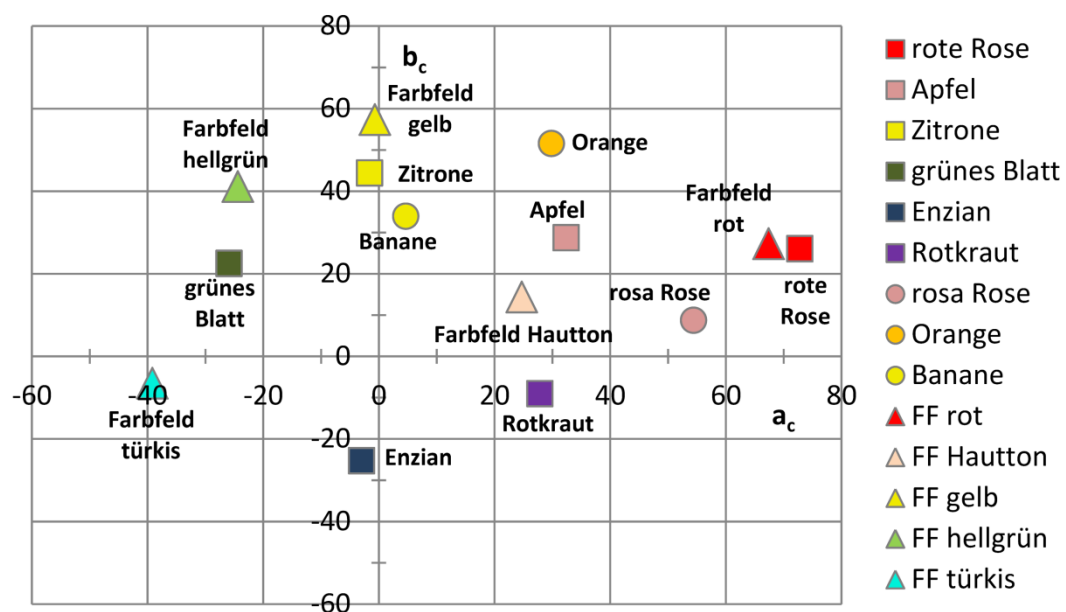


Abbildung 5.5: Farbörter der Testobjekte unter Halogenglühlampen-Beleuchtung (CIECAM02  $a_c b_c$ -Ebene)

Die ausgewählten Farbfelder weisen ebenfalls ausgeprägte steile Flanken auf – dementsprechend hoch zeigt sich die Farbsättigung in Abbildung 5.5. Die Farbfelder (Dreiecke) sind weit vom Koordinatenursprung entfernt. Eine Ausnahme bildet das ungesättigte Farbfeld Hautton.

Die Farbörter der Testobjekte sind über den gesamten Bunttonkreis verteilt. Der erste Quadrant mit roten bis gelben Objekten ist jedoch gegenüber den restlichen drei Quadranten deutlich überrepräsentiert. Im Gegensatz zum Zweikammer-Box-Versuch stand hier nicht die gleichmäßige



Verteilung im Vordergrund, sondern die Gegenüberstellung verschiedener Objektkategorien (siehe Tabelle 5.2).

### 5.1.2 Lichtquellen

Die im Versuch verwendeten Lichtquellen stellen Mischungen aus Halogenglühlampen, Halbleiter-LEDs der Farben Rot, Grün und Blau ( $\lambda_{peak} = 647, 529$  und  $474$  nm) und zwei Sorten warmweißer LEDs ( $R_a = 67$  und  $97$ ) dar. Die Mischungen werden auf gleiche Beleuchtungsstärke auf dem Tisch sowie gleichen Farbtort abgeglichen. Im Zweifelsfall wird auf visuelle Gleichheit (Weißstandard auf dem Tisch) jeder Testlichtquelle zur Referenzlichtquelle abgeglichen und nicht auf gleiche Anzeigewerte eines Messgerätes (siehe dazu auch [59]). In Tabelle 5.3 sind die resultierenden Werte für die einzelnen Farbkanäle aufgelistet. Sie werden als Tastverhältnis für die PWM-Ansteuerung verwendet. Die Bittiefe beträgt dabei 15 Bit (Wertebereich 0...32767), die Wiederholfrequenz 450 Hz.

Tabelle 5.3: Mischung der Lichtquellen aus Halogenlampen, RGB- und weißen LEDs

	$R_a$	Reihenfolge im Test	LED Rot	LED Grün	LED Blau	LED C3L	LED HC3L	Halogen- lampe	CCT [K]
Referenz- lichtquelle	100	1...10	0	0	0	0	0	30720	2680
Testlichtquellen	18	2	32736	26240	8000	0	0	0	3000
	40	6	21920	18720	5920	2720	0	0	2780
	50	8	18080	15840	5440	3840	0	0	2780
	60	10	15040	13760	4960	4800	0	0	2800
	70	5	12320	11360	4320	5920	0	0	2780
	75	3	10240	9600	3200	5120	2560	0	2770
	75	1	0	480	480	9760	3040	0	2820
	80	9	480	960	0	7840	5440	0	2810
	85	4	1280	1600	0	7040	6080	0	2790
	93	7	2400	2880	0	4800	8320	0	2790

Abbildung 5.6 zeigt die resultierende spektrale Strahlungsverteilung der Referenz- und Testlichtquellen, geordnet nach ihrem  $R_a$ -Wert. Mit zunehmendem  $R_a$ -Wert nähert sich die spektrale Form der LED-Mischungen ( $R_a = 18...93$ ) der Halogenglühlampe ( $R_a = 100$ ) an.

Beim Aufbau des Tabletop-Versuches wird auf eine möglichst gleichmäßige und schattenfreie Ausleuchtung der Testobjekte geachtet. Dies erfordert eine großflächige Beleuchtung der ca. 50 cm · 50 cm großen aktiven Tischfläche. Die einzelnen LEDs und Halogenglühlampen werden dazu gleichmäßig auf einem ebenfalls 50 cm · 50 cm großen Kühlkörper verteilt. Im Abstand von ca. 20 cm wird unter dem Kühlkörper eine Streuscheibe angebracht. Diese ist ca. 50 cm über der Tischoberfläche positioniert. Auf der aktiven Tischfläche wird damit eine Beleuchtungsstärke von  $705 \pm 5$  lx erreicht. Abbildung 5.6 zeigt die spektrale Strahlungsverteilung aller Lichtquellen, gemessen auf der Tischfläche mit Hilfe des Weißstandards (Objekt 15 in Abbildung 5.2).

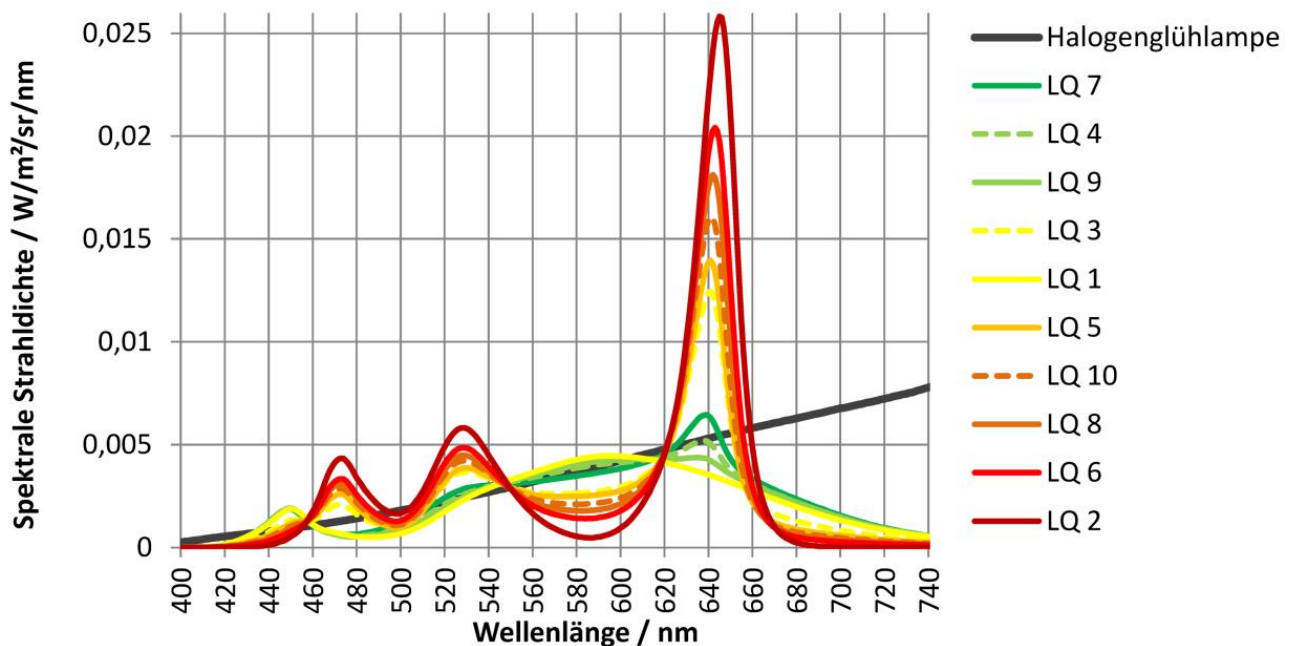


Abbildung 5.6: Spektrale Strahlungsverteilung der Referenz- und Testlichtquellen

Der Kühlkörper wird aktiv auf eine Temperatur von  $40 \pm 1$  °C stabilisiert. Um die Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit der eingestellten Lichtquellen zu erhöhen, werden vor Beginn des Abgleiches alle Lichtquellen mindestens 100 Stunden bei voller Leistung eingebrannt.

Während der Versuchsdurchführung (ein Zeitraum von einigen Wochen) werden die Lichtquellen durch regelmäßige Messungen überwacht. Details dazu enthält Anhang 0 „Tabletop“ ab Seite 142.

### 5.1.3 Fragebogen

Mit Hilfe einer speziell erstellten PC-Anwendung wird die Rückmeldung der Versuchsperson abgefragt. Die Bedienoberfläche des Programms (siehe Abbildung 5.7) hält einen vertikalen Schiebebalken (Slider) bereit, mit dem die Versuchsperson einen Wert zwischen 0 und 100 eingeben kann. Abgefragt wird die Übereinstimmung in der wahrgenommenen Farbe eines Testobjektes zwischen Referenz- und Testlichtquelle.

Im Unterschied zu vorangegangenen eigenen Versuchen und ähnlichen Versuchen anderer Forschergruppen ist die verwendete Skala mit Ankerpunkten („ausgezeichnet“, „sehr gut“ usw.)



beschriftet. Anzahl, Bezeichnung und Position der Ankerpunkte auf der Skala sind das Ergebnis der Vorversuche zu semantischen Kategorien (siehe Abschnitt 4 ab Seite 84).

Der linke Teil des Programmfensters enthält Informationen zum Fortschritt des Versuchslaufes wie aktuelles Testobjekt, Nummer der zu testenden Lichtquelle und aktuelle Einstellung der Lichtquelle (Referenz- oder Testlichtquelle).

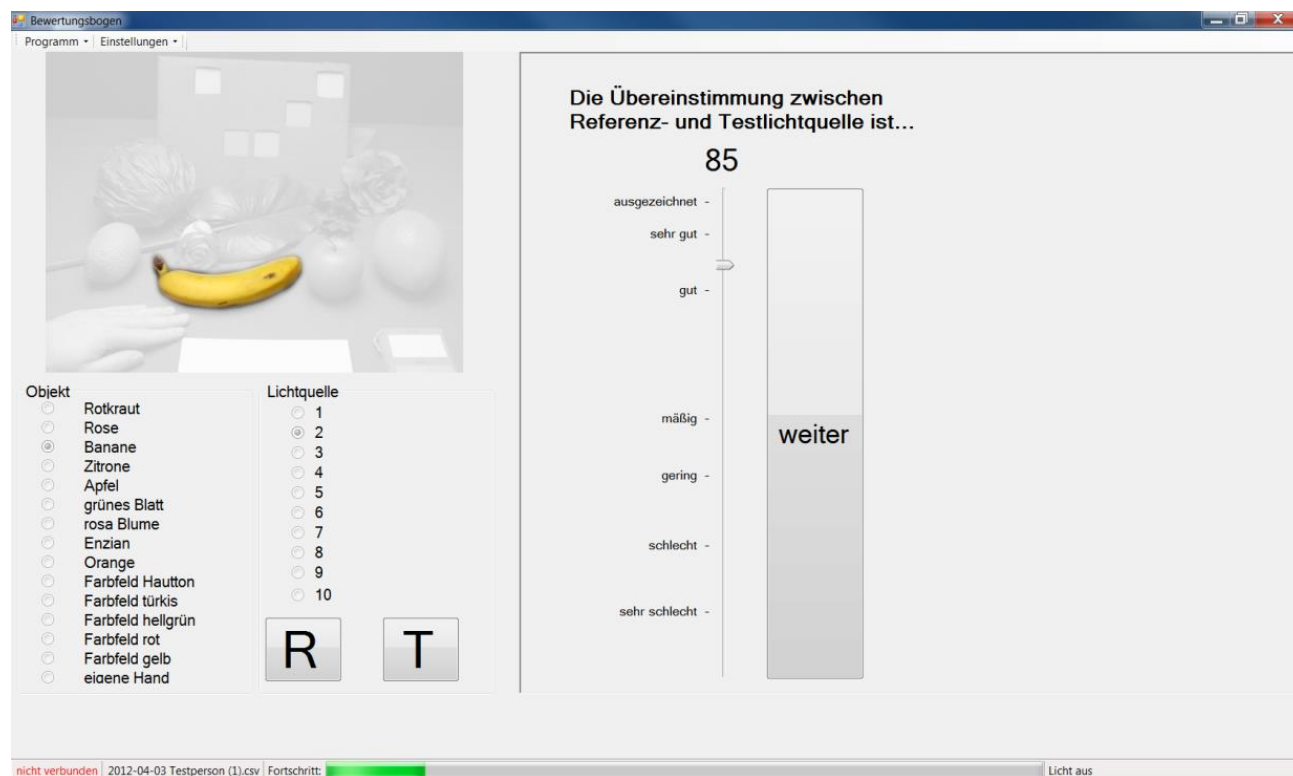


Abbildung 5.7: Bedienoberfläche der Fragebogen-Software

### 5.1.4 Versuchspersonen und Durchführung

Im Anhang zeigt Tabelle B.3 auf Seite 174 eine Übersicht der Versuchspersonen. Am Versuch nahmen insgesamt 22 Testpersonen teil. In der Altersstruktur dominiert der Bereich zwischen 20 und 30 Jahren. Mit einigen Versuchspersonen wurden im Abstand von einigen Wochen wiederholte Durchläufe durchgeführt, so dass Daten für 28 Versuchsdurchläufe für die Auswertung zur Verfügung stehen. Alle Personen wurden mit den „Farnsworth Panel D-15“ [140] und „Lanthony Desaturated Panel D-15“ [141] Farblegetests (Fotos siehe Abbildung 3.10) auf Farbfehlsichtigkeit untersucht. Es wurden nur Personen mit positivem Testergebnis – d. h. ohne Hinweise auf Farbfehlsichtigkeiten – als Versuchsperson zugelassen.

Vor Beginn des Versuches liest der Versuchsleiter die Rahmenbedingungen für den Versuch und die Instruktionen für die Testperson vor. Die Versuchsperson soll empfundene Farbabweichungen kritisch bewerten, so wie es bei der Abmusterung von Druckerzeugnissen der Fall wäre. Sie hält dazu während des Versuches eine Fernbedienung mit zwei Knöpfen in den Händen (siehe

---

Abbildung 5.1), mit der mehrfach zwischen Referenz- und Testlichtquelle umgeschaltet werden kann. Während des gesamten Versuches liegen die Testobjekte (siehe Abbildung 5.2) unverändert auf dem Tisch, die Versuchsperson soll sich auf das aktuell ausgewählte Objekt (siehe Abbildung 5.7) konzentrieren und nur dessen Farbveränderung durch das Umschalten der Lichtquelle bewerten. Die Betrachtung beider Zustände erfolgt also nicht simultan, sondern nacheinander.

Erst nachdem die Versuchsperson ihr Urteil gefällt hat, wendet sie Ihren Blick dem PC zu und gibt ihre Bewertung auf der Skala ein. Dadurch wird eine Adaptationsänderung durch Betrachtung des PC-Bildschirms verhindert, zusätzlich wird die Hintergrundbeleuchtung des Bildschirms auf ein geringes Helligkeitsniveau eingestellt.

Durch Betätigung des Buttons „Weiter“ stellt der PC die nächste Lichtquellenkombination ein. Dabei startet jede Kombination mit dem Einschalten der Referenzlichtquelle, um der Testperson einen konstanten Basisreiz zu bieten. So werden für ein Objekt alle 10 Testlichtquellen (LED-Mischungen, siehe Abschnitt „Lichtquellen“ ab Seite 94) mit der immer gleichen Referenzlichtquelle (Halogen-glühlampe) verglichen. Die Reihenfolge der Lichtquellen ist dabei für jede Testperson gleich. Das PC-Programm speichert alle eingegebenen Bewertungen in einer CSV-Datei, die sehr einfach zur Auswertung in Microsoft Excel importiert werden kann.

---

## 5.2 Kategorisierung der Farbdifferenzwahrnehmung

---

Anknüpfend an Abschnitt 2.1.6 soll nun der Zusammenhang zwischen messtechnischem  $\Delta E_{CIECAM02-UCS}$  und empfundenem (kategorisiertem) Farbunterschied ausgewertet werden. Dazu werden die vermessenen Reflexionsspektren der Objekte unter allen Lichtquellen mit dem CIE 1964 10°-Normalbeobachter bewertet und in den CIECAM02-UCS-Farbraum überführt. Hierfür werden folgende Parameter benutzt:  $Y_B = \frac{L_A}{5}$ ,  $F = 1$ ,  $c = 0,69$ ,  $N_c = 1$  (average surround). Die Adaptationsleuchtdichte  $L_A$  entspricht dem individuell auf dem Weißstandard gemessenen Leuchtdichtenniveau und beträgt etwa  $230 \frac{cd}{m^2}$ . Es ergibt sich ein Adaptationsgrad von  $D = 0,986$ .

Um Streuungen zwischen Versuchspersonen zu minimieren werden die abgefragten visuellen Bewertungen durch eine Z-Transformation auf gleichen Mittelwert und gleiche Standardabweichung normiert und abschließend wieder mit Hilfe des Gesamtmittelwertes bzw. der Gesamtstandardabweichung auf annähernd den ursprünglichen Wertebereich verteilt. Während die visuellen Urteile vor dieser Operation dem Einfluss von beidem – Testobjekt und Testperson – unterlagen, ist der individuelle Einfluss der Testpersonen nun eliminiert und es kann ein aussagekräftiger Mittelwert über alle Versuchspersonen gebildet werden (siehe Tabelle 5.4).

Das Ziel der Auswertung ist es nun, einen Zusammenhang zwischen messtechnisch ermittelter Farbdifferenz  $\Delta E$  und visueller (kategorisierter) Bewertung  $R$  zu finden. Der Zusammenhang soll analytisch mit einer Formel beschrieben werden und soll invertierbar sein, d. h. die Formel soll es ermöglichen in beide Richtungen umzurechnen, sowohl von  $\Delta E$  in  $R$  als auch umgekehrt von  $R$  in  $\Delta E$ . Durch die vorhandenen Kategorie-Labels an der  $R$ -Skala wäre damit eine universelle Grundlage

geschaffen, um Bewertungen beispielsweise im Bereich Farbwiedergabe oder LED-Binning vorzunehmen.

Tabelle 5.4 zeigt die berechneten Mittelwerte der visuellen Bewertungen  $R$  (zweite Spalte von links), zusammengefasst für Gruppen von  $\Delta E$ -Werten. Erwartungsgemäß wird mit zunehmendem  $\Delta E$  visuell schlechter bewertet.

Tabelle 5.4: Visuelle Bewertungen des Tabletop-Versuchs

$\Delta E_{CIECAM02-UCS}$	Visuelle Bewertung (Rating $R$ )		
	Gruppe	Mittelwert	Standard-abweichung
	0-1	85,7	16,1
	1-2	78,7	16,3
	2-3	65,3	22,7
	3-4	56,5	18,9
	4-5	46,8	19,0
	5-6	38,9	18,6
	6-7	30,8	16,4
	7-8	19,3	13,6
	8-9	21,8	12,4
	9-10	13,1	10,7
	10-11	16,2	10,9
	11-12	10,1	9,4
	13-14	5,9	10,4

### 5.2.1 Beschreibende Funktion ermitteln

Im nächsten Schritt soll eine Funktion an den Verlauf der Mittelwerte gefittet werden, dabei werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die Funktion soll invertierbar sein, d. h. es soll für beide Richtungen eine Funktion definiert sein,  $R = f(\Delta E)$  und  $\Delta E = f(R)$ .
- Die Funktion soll monoton fallenden Charakter haben. Bessere Bewertungen  $R$  mit zunehmendem  $\Delta E$  würden keinen Sinn ergeben.
- Die Funktion soll durch den Punkt ( $\Delta E = 0$ ,  $R = 100$ ) verlaufen.

Alle beschriebenen Anforderungen werden von einer Gauss-Funktion nach Formel 5.1 erfüllt, wenn  $a = 100$  und  $b = 1$  verwendet werden.

$$R = \frac{a}{\sqrt{b \cdot e^{c \cdot \Delta E^2}}} \quad \text{Formel 5.1}$$

Um den optimalen Wert für die Konstante  $c$  zu bestimmen wird die Summe der Abstandsquadrate zwischen experimenteller Funktion und Gauss-Fit minimiert. Dies führt zu einem Wert von  $c = 0,45$  ( $R^2 = 0,975$ ,  $p = 0,021$ ).

$$R = \frac{100}{\sqrt{e^{0,045 \cdot \Delta E^2}}} \quad \text{Formel 5.2}$$

Die Fehlerbalken der experimentellen Ergebnisse in Abbildung 5.8 zeigen die einfache Standardabweichung der Datenpunkte. Die gefundene Gauss-Funktion liegt mit zwei knappen Ausnahmen ( $\Delta E=1-2$  und  $3-4$ ) innerhalb dieser Grenzen. Auffällig ist, dass der Mittelwert der experimentell ermittelten Bewertungen auch bei sehr kleinen Farbdifferenzen ( $\Delta E \approx 0$ ) nicht den Wert 100 erreicht. Als Ursache dafür werden Probleme der niederen Farbmeterik mit Beleuchtungsmetamerie vermutet: Bei (annähernd) gleichen spektralen Verteilungen von Referenz- und Testlichtquelle müsste eine Farbdifferenz von  $\Delta E = 0$  zu einem nicht wahrnehmbaren Farbunterschied führen. Im Experiment wiesen beide Lichtquellen aber deutlich unterschiedliche spektrale Verteilungen auf – wenn nun die bewertenden Spektralwertfunktionen (in diesem Fall der CIE 1964 10°-Normalbeobachter) nicht genau die Farbempfindung der einzelnen Probanden abbilden, kann es zu wahrgenommenen Farbunterschieden trotz messtechnisch gleicher Farbvalenzen kommen.

Genauer diskutiert wird dieser Effekt in Abschnitt 8.1 ab Seite 123. Für die Auswertung des Tabletop-Versuchs muss davon ausgegangen werden, dass die experimentellen Daten bei kleinen Farbdifferenzen entsprechend korrigiert werden müssen, so dass sie den Punkt ( $\Delta E = 0$ ;  $R = 100$ ) schneiden. Abbildung 5.8 zeigt die unkorrigierten Daten.

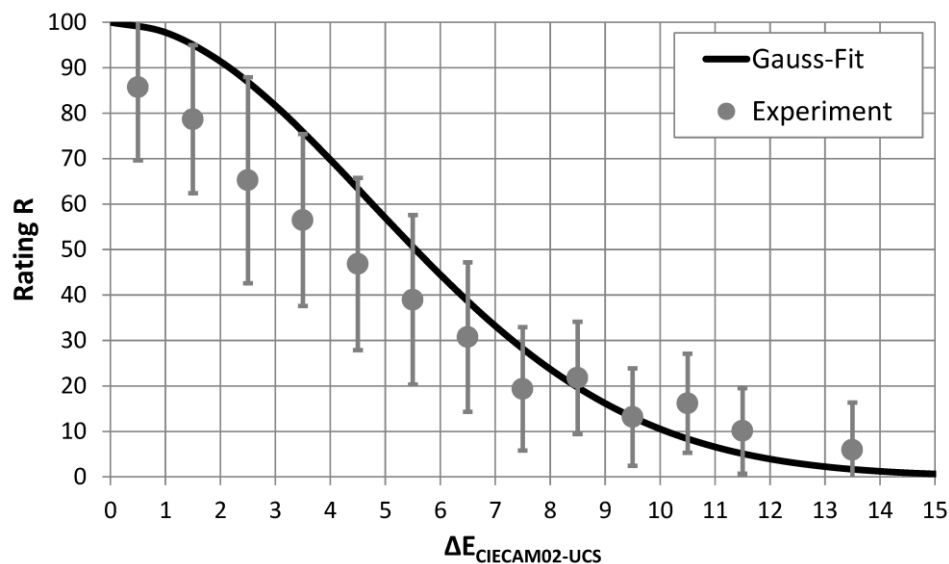


Abbildung 5.8: Gauss-Fit (durchgezogene Linie) der experimentellen visuellen Bewertungen  $R$  (Mittelwerte mit Standardabweichung)

Der S-förmige Verlauf gibt die Erfahrungen während der Versuchsdurchführung wieder: Probanden können sehr kleine Farbdifferenzen nur schwer unterscheiden (ein Designziel vieler Farbräume ist es, mit  $\Delta E = 1$  die Wahrnehmungsschwelle zu beschreiben) während die genaue Quantifizierung

sehr großer Farbdifferenzen ( $\Delta E > 10$ ) für viele Anwendungen von untergeordneter Bedeutung ist. Der aus Anwendungssicht relevante Bereich der kleinen und mittleren Farbdifferenzen erhält mit diesem Verlauf die größte Gewichtung.

Abbildung 5.9 zeigt einen Vergleich des gefundenen Verlaufs (Gauss-Fit) mit den existierenden Bewertungsfunktionen für CIE CRI ( $R = 100 - 4,6 \cdot \Delta E$ ) und CRI 2012 (Formel 2.44) mit den beiden vorgeschlagenen Konstanten  $k = \frac{1}{55}$  und  $k = \frac{2}{45}$ . Außerdem ist die beste Annäherung der experimentellen Ergebnisse durch eine lineare Funktion (Linear-Fit,  $R = 100 - 8,7 \cdot \Delta E$ ) eingezeichnet. Die damit erreichbare Summe der Abstandquadrate ist schlechter als im Fall des Gauss-Fits, d. h. es verbleiben größere Abstände zwischen experimentellem Verlauf und gefundener Funktion. Bestimmtheitsmaß und T-Test liefern ebenfalls schlechtere Werte ( $R^2 = 0,925$ ,  $p = 0,14$ ).

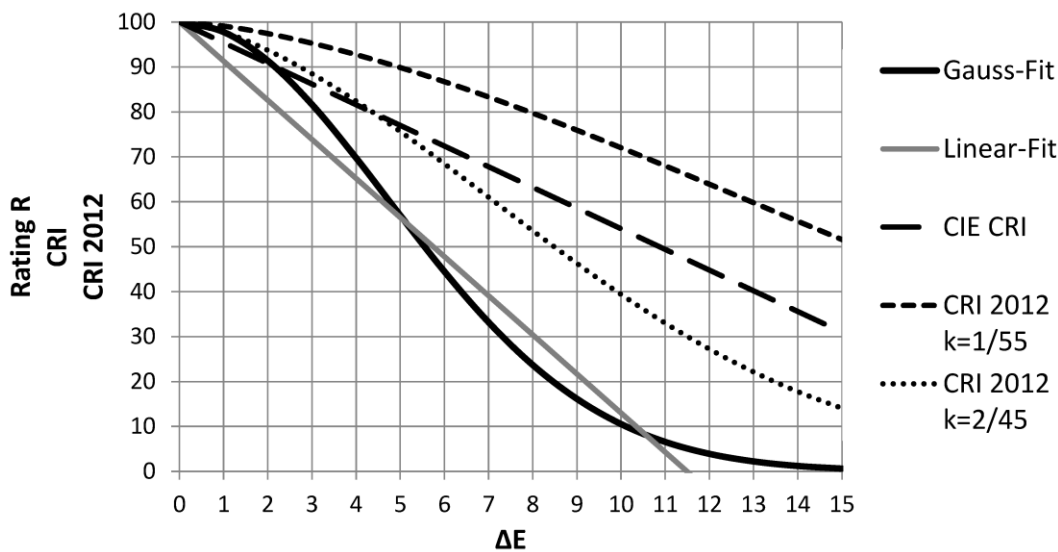


Abbildung 5.9: Vergleich der Bewertung (R auf Skala 0-100) der eigenen Tabletop-Ergebnisse sowie für CIE CRI (lange Striche) und CRI 2012 (kurze Striche und Punkte)

Bemerkenswert ist, dass der Anstieg der Gerade mit einem Wert von -8,7 etwa den doppelten Wert des CIE CRI (-4,6) erreicht. Auch im Vergleich zum CRI 2012 findet die Abnahme der Bewertung  $R$  mit Zunahme der Farbdifferenz  $\Delta E$  schneller statt. Nach den experimentellen Ergebnissen müssen also im Vergleich zu CIE CRI und CRI 2012 schon bei kleineren Farbdifferenzen schlechte Bewertungen vergeben werden.

### 5.2.2 Berechnung von $\Delta E$ -Werten für die Kategorien

Ein weiterer interessanter Punkt ist die Umkehr-Rechnung, um von kategorisierten Bewertungen auf  $\Delta E$ -Werte zu schließen. Dazu wird Formel 5.2 nach  $\Delta E$  umgestellt. Nun können die auf der  $R$ -Skala bekannten Positionen der semantischen Kategorien auf  $\Delta E$ -Werte (im CIECAM02-UCS-Farbraum) übertragen werden.

$$\Delta E = \sqrt{\frac{\ln\left(\left(\frac{100}{R}\right)^2\right)}{0,045}}$$

Formel 5.3

Die dritte Spalte in Tabelle 5.5 listet die  $R$ -Werte der Kategorien auf, jeweils für Mittelwert und Mittelwert  $\pm$  95% Konfidenzintervall (siehe dazu auch Abschnitt 4.3). In der vierten Spalte finden sich die mit Formel 5.3 berechneten Farbdifferenzwerte  $\Delta E_{CIECAM02-UCS}$ . Analog zu Abschnitt 4.4 werden Farbdifferenzwerte für den Übergang von einer Kategorie zur nächsten berechnet – beispielsweise wird für die Grenze zwischen „schlecht“ und „sehr schlecht“ der Wert  $\Delta E = 8,5$  als Mittelwert von 8,0 und 9,0 gebildet.

Tabelle 5.5: Farbdifferenzwerte für die semantischen Kategorien

Kategorie		$R$	$\Delta E_{CIECAM02-UCS}$	$\Delta E$ -Grenze
ausgezeichnet	Mittelwert + Konf.	98,9	0,7	
	Mittelwert	97,9	<b>1,0</b>	
	Mittelwert – Konf.	96,8	1,2	
				1,5
sehr gut	Mittelwert + Konf.	93,7	1,7	
	Mittelwert	91,6	<b>2,0</b>	
	Mittelwert – Konf.	89,5	2,2	
				2,6
gut	Mittelwert + Konf.	81,9	3,0	
	Mittelwert	79,6	<b>3,2</b>	
	Mittelwert – Konf.	77,3	3,4	
				4,2
mäßig	Mittelwert + Konf.	56,4	5,0	
	Mittelwert	52,9	<b>5,3</b>	
	Mittelwert – Konf.	49,3	5,6	
				5,8
gering	Mittelwert + Konf.	44,6	6,0	
	Mittelwert	41,2	<b>6,3</b>	
	Mittelwert – Konf.	37,7	6,6	
				7,0
schlecht	Mittelwert + Konf.	29,5	7,4	
	Mittelwert	26,5	<b>7,7</b>	
	Mittelwert – Konf.	23,4	8,0	
				8,5
sehr schlecht	Mittelwert + Konf.	15,9	9,0	
	Mittelwert	12,8	<b>9,6</b>	
	Mittelwert – Konf.	9,6	10,2	

Diese Ergebnisse sind die Grundlage für die Anwendung der kategorisierten Farbwahrnehmung in Kapitel 6 und Kapitel 7.

### 5.2.3 Vergleich zwischen Tabletop und Zweikammer-Box

Abbildung 5.10 zeigt die kategorisierten visuellen Bewertungen beider Experimente in einem Diagramm. Die Skalierung der Ordinatenachsen wird dabei so gewählt, dass die Minimum- und Maximum-Antwortwerte die Endpunkte darstellen, d. h. 0 und 100 im Tabletop-Fall bzw. 1 und 5 im Fall der Zweikammer-Box. Beide Kurven stellen die Z-transformierten Bewertungen dar. Damit wird der Einfluss von interpersonellen Streuungen auf ein Minimum reduziert. Die Fehlerbalken stellen die einfachen Standardabweichungen dar, sie zeigen bis etwa  $\Delta E = 6$  deutliche Überlappungen.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Experimenten stellt die verwendete kategorisierte Skala dar. Während in der Auswertung des Zweikammer-Box-Versuchs die fünf willkürlich gewählten Begriffe den gleichabständigen Zahlenwerten 1 bis 5 zugewiesen werden, liegt der Tabletop-Skala der Vorversuch zu semantischen Kategorien zu Grunde. Die sieben ausgewählten Begriffe verteilen sich damit ungleichmäßig auf einer empfindungsgemäß gleichabständigen Skala im Wertebereich 0 bis 100. Dies erklärt das unvollständige Ausnutzen des Wertebereiches im Box-Experiment: Selbst bei sehr kleinen Farbdifferenzen  $\Delta E$  liegt der Mittelwert der Bewertungen nicht in der höchsten Kategorie „tadellos“, sondern darunter. Möglicherweise empfinden die Probanden den Abstand zwischen „tadellos“ und „gut“ als kleiner als die Abstände der anderen Kategorie-Begriffe untereinander. Die Ergebnisse des Vorversuchs (Kapitel 4) legen das nahe – die Probanden sehen hier die oberen beiden Begriffe sehr dicht beieinander angeordnet.

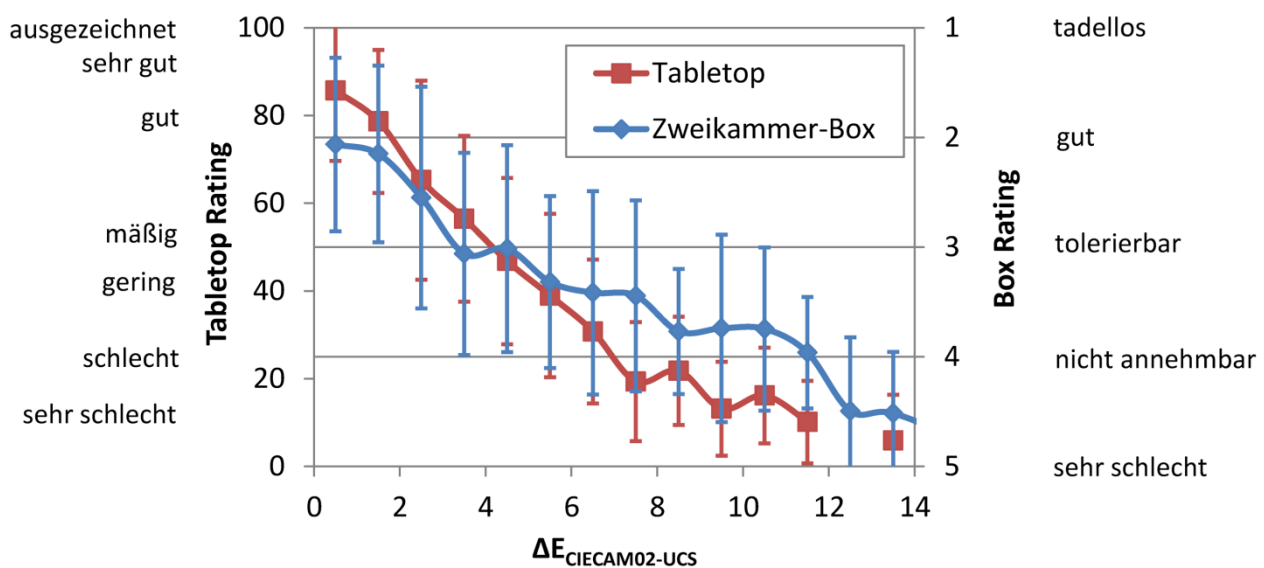


Abbildung 5.10: Vergleich der kategorisierten visuellen Bewertung aus Tabletop- (rote Kurve, linke Skala) und Zweikammer-Box-Experiment (blaue Kurve, rechte Skala) – Mittelwerte und Standardabweichungen

Es fällt ebenfalls auf, dass die visuelle Bewertung im Tabletop-Experiment mit steigendem  $\Delta E$  schneller abfällt als im Zweikammer-Box-Experiment. Im Bereich zwischen  $\Delta E = 2$  und  $\Delta E = 6$  ist der Verlauf der beiden Kurven aber nahezu übereinstimmend, erst ab  $\Delta E > 6$  zeigen die Tabletop-Ergebnisse schlechtere Bewertungen als die Zweikammer-Box-Ergebnisse. Genau dieser Bereich

( $2 < \Delta E < 6$ ) ist der für die kritische Bewertung von Lichtquellen interessante Bereich kleiner und mittlerer Farbdifferenzen.

Die Verteilung der betrachteten Farbdifferenzen in beiden Experimenten zeigt Abbildung 5.11. Die absolute Anzahl abgegebener Bewertungen ist im Tabletop-Experimentes ( $N = 3920$ ) deutlich höher als im Zweikammer-Box-Experiment ( $N = 1360$ ). Mit dem Verlauf der beiden Kurven kann die Frage beantwortet werden: Wurden vorwiegend kleine oder große Farbdifferenzen bewertet, oder beides?

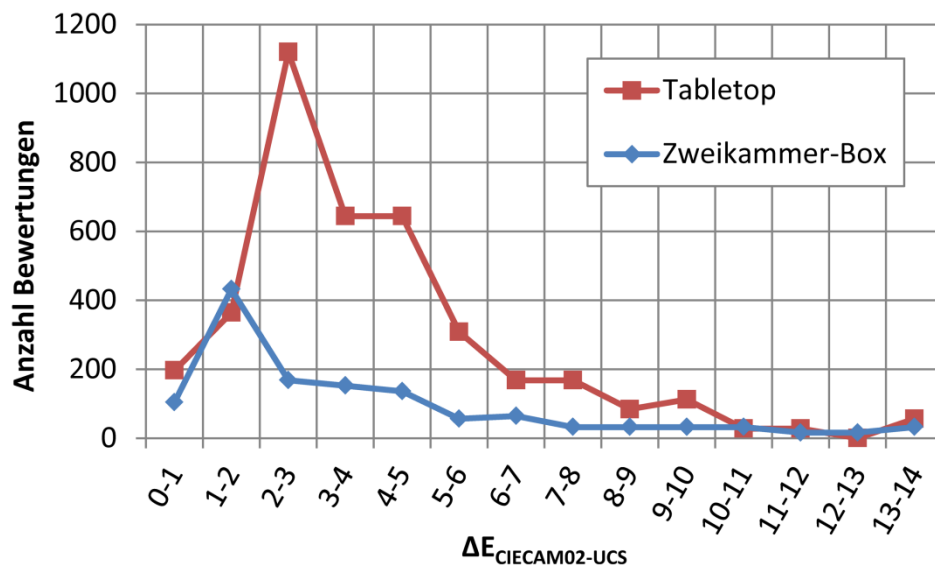


Abbildung 5.11: Verteilung der bewerteten Farbdifferenzen in beiden Experimenten

Der Median liegt im Tabletop-Fall bei  $\Delta E = 3,4$ ; 50% der bewerteten Farbdifferenzen liegen oberhalb, 50% unterhalb dieses Wertes. Für die Zweikammer-Box weist der Median mit  $\Delta E = 2,8$  einen etwas kleineren Wert auf. In beiden Versuchen liegen 75% der Farbdifferenzen unterhalb von  $\Delta E = 5$ . Es wurden also im Wesentlichen kleine Farbdifferenzen bewertet, der Anteil an großen Farbdifferenzen ist gering ( $\Delta E > 10$ : Tabletop  $< 2\%$ , Zweikammer-Box  $< 10\%$ ). In der Literatur werden kleine Farbdifferenzen (SCD) oft mit der Angabe  $\Delta E < 5$  verknüpft [14-16].

## 5.3 Einfluss der Testobjekte

Gibt es Unterschiede in der Bewertung der einzelnen Objekte, aufgrund ihres Bunttons oder der Farbsättigung? Welchen Einfluss hat die Objektart (Farbfeld, künstlich, natürlich) auf die Bewertung von Farndifferenzen? Diesen Fragen soll nun nachgegangen werden.

### 5.3.1 Buntton

Abbildung 5.5 (Seite 93) zeigt die Testobjekte in der Farbebene. Für die folgenden Untersuchungen werden die Objekte in 7 Buntton-Gruppen eingeteilt, abhängig von ihrem Bunttonwinkel. Die Gruppen heißen „Rot“, „Orange“, „Gelb“, „Grün“, „Türkis“, „Blau“ und „Violett“, siehe Tabelle 5.6.



Tabelle 5.6: Bestimmtheitsmaße für den Gesamt-Fit und individuell gefittete Funktionen jeder Bunttongruppe

		Rot	Orange	Gelb	Grün	Türkis	Blau	Violett
Objekte		rote Rose FF rot rosa Rose	Orange Apfel FF Haut	FF gelb Zitrone Banane	FF hellgr. gr. Blatt	FF türkis	Enzian	Rotkraut
Fit gesamt $c = 0,045$	$R^2$	0,94	0,90	0,81	0,96	0,73	0,84	0,96
	$p$	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,007	0,004	<0,001
Fit individuell	$c$	0,06	0,06	0,08	0,1	0,1	0,1	0,08
	$R^2$	0,94	0,90	0,85	0,95	0,74	0,85	0,98
	$p$	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,006	0,003	<0,001

Im vorangegangenen Abschnitt wurde für den Zusammenhang zwischen gemessener Farbdifferenz und visueller Bewertung eine Formel gefunden (Formel 5.2). Diese wurde aus dem Gesamtzusammenhang – ohne Unterscheidung der Testobjekte – extrahiert. Wie aber sehen die Einzelergebnisse für jede Bunttongruppe aus? Unterscheiden sich die Bunttongruppen, ist eine individuelle Bestimmung der Konstante  $c$  in Formel 5.1 sinnvoll? Im Anhang ab Seite 147 sind dazu alle Diagramme enthalten.

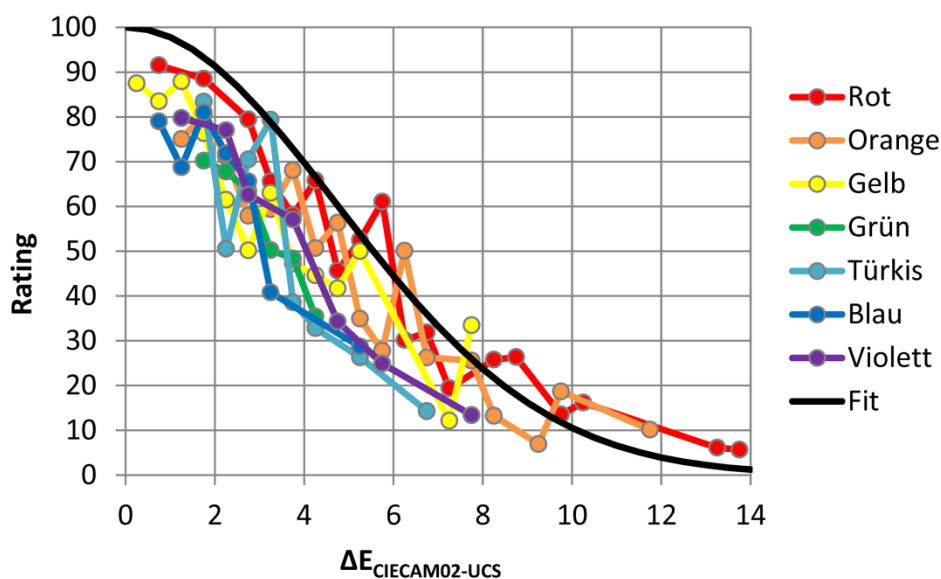


Abbildung 5.12: Zusammenhang zwischen visueller Bewertung und Farbdifferenz nach Bunttongruppe

Im zweiten und dritten Quadranten (Grün, Türkis, Blau) zeigt sich gegenüber Rot und Gelb mit zunehmender Farbdifferenz ein schnellerer Abfall der *Rating*-Werte. Entsprechend fallen die individuellen  $c$ -Werte größer aus, so dass die gefittete Funktion (Formel 5.1;  $a = 100$ ,  $b = 1$ ) einen steileren Abfall zeigt.

Die individuelle Bestimmung der Konstante  $c$  führt jedoch kaum zu einer Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  zwischen experimentellen Datenpunkten und gefitteter Funktion.

Abgesehen von Türkis korrelieren für alle Bunttongruppen Datenpunkte und Gesamt-Fit ( $c = 0,045$ ) sehr gut und auf hohem Signifikanzniveau miteinander.

Für den Zusammenhang zwischen visueller Bewertung und Farbdifferenz ist eine Unterscheidung nach Buntton daher nicht sinnvoll. Der zusätzliche Aufwand bei der Anwendung gegenüber der Verwendung einer einzigen Funktion (Gesamt-Fit) ist nicht gerechtfertigt.

### 5.3.2 Farbsättigung

Es können zwei Gruppen gebildet mit hoher bzw. niedriger Farbsättigung (außen bzw. innen im Bunttonkreis) gebildet werden: „Gesättigte Objekte“ und „Ungesättigte Objekte“.

Tabelle 5.7: Zusammenfassung der Testobjekte zu Farbsättigungsgruppen

Unterscheidungsmerkmal	Gruppe	Testobjekte
Farbsättigung	Ungesättigte Objekte	rosa Rose, Apfel, Farbfeld Hutton, Banane
	Gesättigte Objekte	rote Rose, Farbfeld rot, Orange, Farbfeld gelb, Farbfeld hellgrün

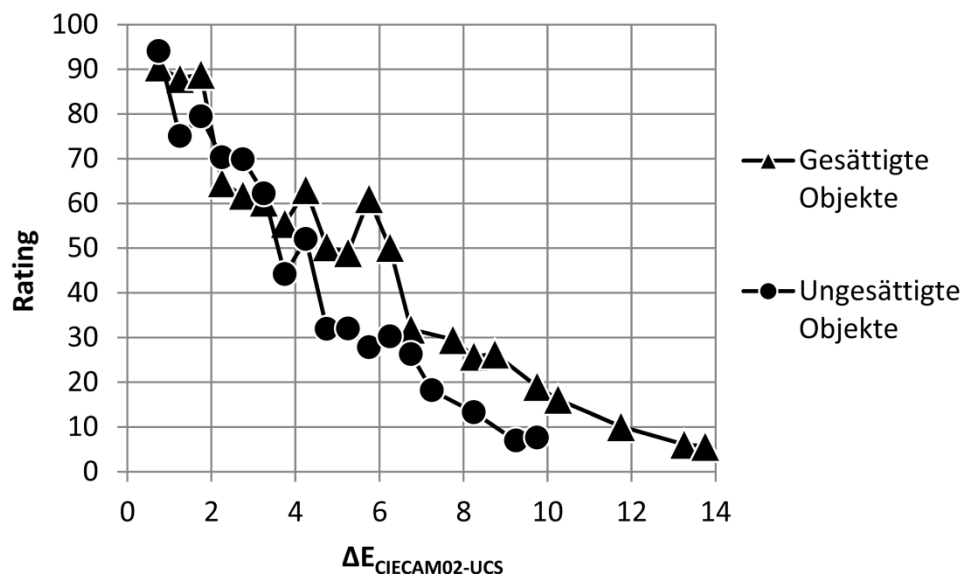


Abbildung 5.13: Vergleich der Bewertung ungesättigter und gesättigter Testobjekte

Die Objekte wurden aus dem ersten und zweiten Quadranten (Bereich Rot-Gelb-Grün, Abbildung 5.5) entnommen, da in diesem Bereich sowohl gesättigte als auch entsättigte Objekte vorhanden sind.

Zwischen beiden Gruppen ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,83$  ( $p < 0,001$ ). Damit zeigt sich, dass kein signifikanter Unterschied in der Bewertung beider Gruppen vorliegt.

### 5.3.3 Objektart

Bei der Auswahl der Testobjekte wurden einige Objekte so ausgewählt, dass ein Vergleich zwischen den drei Objektarten möglich wird (siehe Abschnitt „Testobjekte“ ab Seite 90). Während Farbfelder homogene einfarbige Flächen ohne Struktur und Textur darstellen, ist die Bewertung von dreidimensionalen künstlichen und natürlichen Objekten durch Effekte wie Schattenwurf etc. komplexer. Die ist ein Grund warum in vielen Experimenten (u. a. im Zweikammer-Box-Versuch) Farbfelder eingesetzt werden – um die zusätzlichen Einflüsse der anderen Objektarten auszuschließen.

Abbildung 5.14 zeigt den Zusammenhang zwischen visueller Bewertung und Farbdifferenz für je ein rotes Objekt jeder Art. Die Bestimmtheitsmaße betragen

- zwischen Farbfeld rot und künstlicher roter Rose  $R^2 = 0,94$  ( $p = 0,0016$ ),
- zwischen Farbfeld rot und natürlicher rosa Rose  $R^2 = 1,0$  ( $p = 0,029$ ) und
- zwischen künstlicher roter Rose und natürlicher rosa Rose  $R^2 = 0,92$  ( $p = 0,0099$ ).

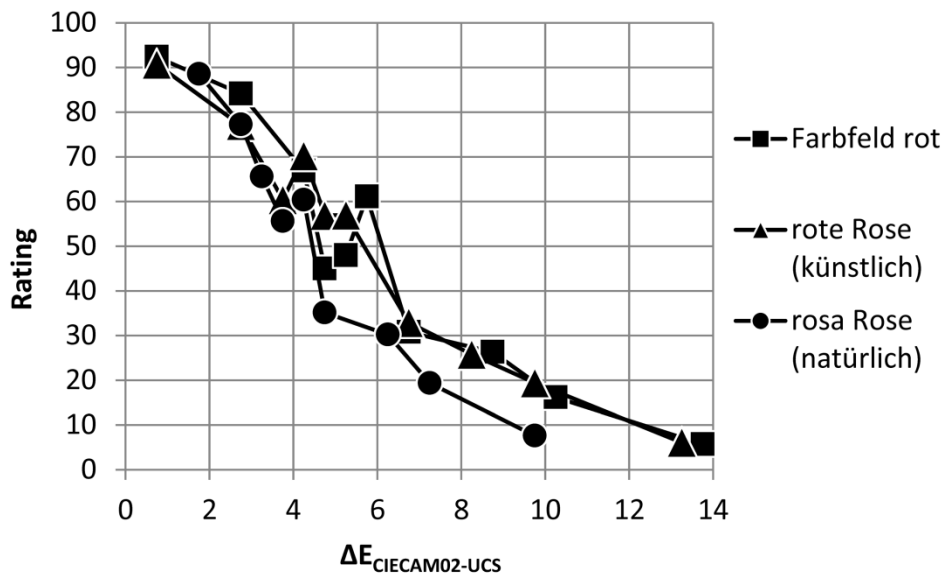


Abbildung 5.14: Vergleich der Bewertungen nach Objektart (rote Objekte)

Für rote Objekte zeigen sich unter den Objektarten sehr hohe Korrelationen auf hohem Signifikanzniveau. Obgleich die Bewertungen der natürlichen rosa Rose im Vergleich mit rotem Farbfeld und künstlicher roter Rose bei mittleren und großen Farbdifferenzen zu etwas schlechteren Werten tendiert ist kein signifikanter Unterschied unter den drei Objektarten feststellbar.

Für gelbe Objekte zeigen sich differenziertere Ergebnisse:

- Farbfeld gelb und künstliche Zitrone:  $R^2 = 0,12$  ( $p = 0,56$ )
- Farbfeld gelb und natürliche Banane:  $R^2 = 0,98$  ( $p < 0,001$ )
- Zitrone und Banane:  $R^2 = 0,44$  ( $p = 0,11$ )

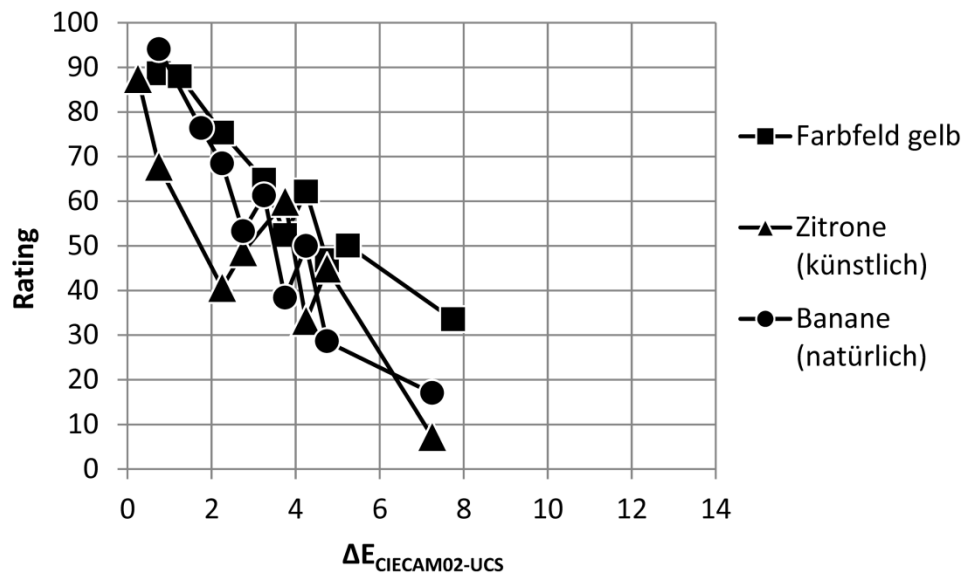


Abbildung 5.15: Vergleich der Bewertungen nach Objektart (gelbe Objekte)

Während sich zwischen gelbem Farbfeld und natürlicher Banane eine sehr gute Korrelation auf sehr hohem Signifikanzniveau zeigt, korrelieren die Ergebnisse der künstlichen Zitrone nicht mit denen der beiden anderen Objekte. Beim Blick auf Abbildung 5.15 stellt man einen untypischen Ergebnis-Verlauf für die Zitrone fest (noch deutlicher in den Abbildungen im Anhang auf Seite 144): Schlechte Bewertung ( $R = 40$ ) bei  $\Delta E \approx 2$ , dann Anstieg auf  $R = 60$  bei  $\Delta E \approx 4$ , bei weiter steigender Farbdifferenz wieder fallende  $R$ -Werte. Zu erwarten wäre eine streng monoton fallende Funktion, d. h. zunehmend schlechtere Bewertung mit steigender Farbdifferenz. Offensichtlich treten bei der Bewertung der Zitrone Interpretationsprobleme bei den Probanden auf. Aus diesem Grund ist es interessanter Objekte aller Farben zu Gruppen der drei Objektarten zusammenzufassen.

Tabelle 5.8: Zusammenfassung der Testobjekte zu Gruppen gleicher Objektart

Unterscheidungsmerkmal	Gruppe	Testobjekte
Objektart	Natürliche Objekte	rosa Rose, Orange, Banane
	Künstliche Objekte	rote Rose, Apfel, Zitrone, grünes Blatt, Enzian, Rotkraut
	Farbfelder	Farbfelder rot, Hautton, gelb, hellgrün und türkis

Nun liegen 840 Bewertungen für natürliche Objekte, 1680 für künstliche und 1400 für Farbfelder vor. Es ergeben sich folgende Bestimmtheitsmaße:

- Natürliche und künstliche Objekte:  $R^2 = 0,81$  ( $p < 0,001$ )
- Natürliche Objekte und Farbfelder:  $R^2 = 0,71$  ( $p = 0,0011$ )
- Künstliche Objekte und Farbfelder:  $R^2 = 0,72$  ( $p < 0,001$ )

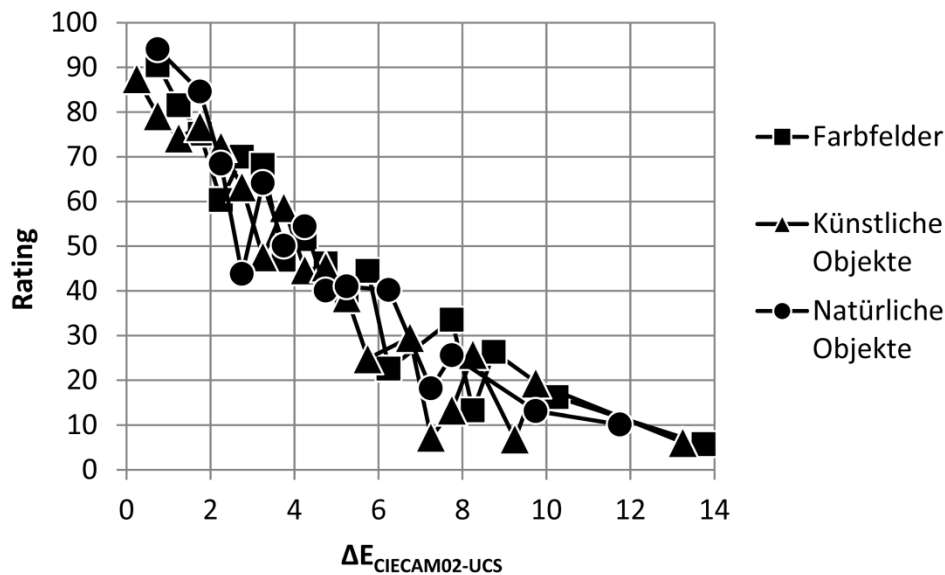


Abbildung 5.16: Vergleich der Bewertungen nach Objektart (alle Objekte)

Offensichtlich ist im Gesamtergebnis im Zusammenhang zwischen visueller Bewertung und Farbdifferenz kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Objektarten feststellbar. Die Objektart scheint keinen Einfluss auf die Bewertung (bei gleicher Farbdifferenz) zu haben.

## 5.4 Lichtquellenspektrum bei konstantem $R_a$

Mit Lichtquelle 1 und Lichtquelle 3 wurden zwei LED-Mischungen getestet, die bei gleicher Beleuchtungsstärke auf dem Tisch und visuell gleichem Farbort auch den gleichen CRI aufweisen ( $R_a = 75$ ). Dennoch unterscheiden sie sich im spektralen Verlauf sowohl untereinander als auch von der Referenzlichtquelle. Führt das zu unterschiedlichen Bewertungen der Testobjekte?

Für Lichtquelle 1 wird ein hoher Anteil der (leuchtstoffkonvertierten) weißen LEDs C3L und HC3L angestrebt, um bei gegebenem CRI ein möglichst gefülltes Spektrum zu erzeugen. Zur Anpassung des visuellen Farbortes an die anderen Lichtquellen werden minimale Anteile grüner und blauer LEDs beigemischt (siehe Tabelle 5.3 auf Seite 94).

Im Gegensatz dazu wird für Lichtquelle 3 ein möglichst großer RGB-Anteil angestrebt. Zum Anheben des CRI auf  $R_a = 75$  werden Anteile der weißen LEDs zugemischt. So erhält Lichtquelle 3 ein sehr „kurviges“ Spektrum mit ausgeprägten Spitzen der RGB-LEDs während Lichtquelle 1 mit gleichmäßiger gefülltem Spektrum der Halogenleuchte näher kommt.

Für Abbildung 5.18 ergibt sich  $R^2 = 0,57$  ( $p = 0,14$ ) – eine mäßige Korrelation auf niedrigem Signifikanzniveau. Allerdings besteht die Überlappung beider Kurven nur aus fünf Datenpunkten zwischen  $\Delta E = 2$  und  $\Delta E = 5$ . Die Fehlerbalken (einfache Standardabweichung) überlappen sich nur an wenigen Punkten. Überraschenderweise erzeugt Lichtquelle 3 trotz ausgeprägter spektraler RGB-Peaks die kleinsten Farbdifferenzen und besten Bewertungen (Datenpunkte  $\Delta E = 0 \dots 1$ ) – Lichtquelle 1 dagegen die größten Farbdifferenzen ( $\Delta E > 5$ ).

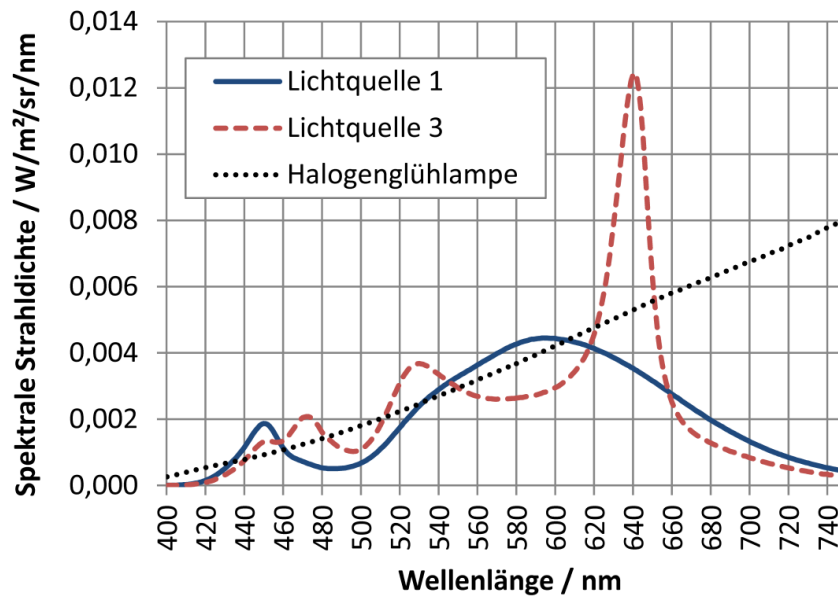


Abbildung 5.17: Spektrale Strahlungsverteilung von Testlichtquellen 1 und 3 sowie der Referenzlichtquelle

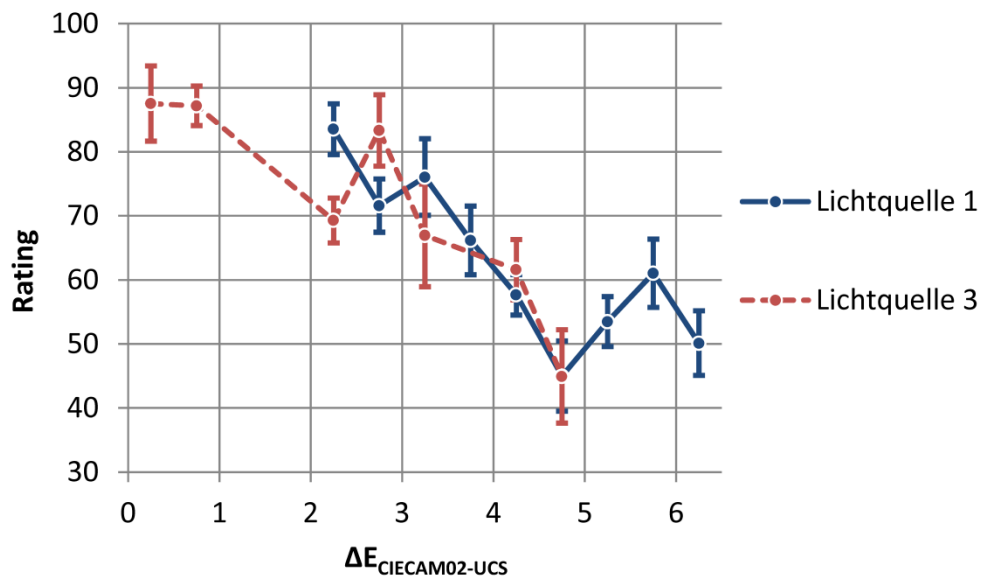


Abbildung 5.18: Vergleich der Bewertungen für die Lichtquellen 1 und 3

Noch interessanter ist aber die Auswertung der visuellen Bewertungen *Rating* ohne den Zusammenhang zur Farbdifferenz  $\Delta E$ . Schließlich haben die Testpersonen die gleichen Objekte unter beiden Lichtquellen betrachtet und es interessieren nur die Unterschiede in ihren visuellen Bewertungen.

Abbildung 5.19 zeigt für alle Testobjekte die Bewertung (Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall) unter Lichtquelle 1 (durchgezogene Kurve) und Lichtquelle 3 (gepunktete Linie). Für die Interpretation ergibt sich nun ein Problem: Die unterschiedlichen Spektren beider Lichtquellen erzeugen auch unterschiedliche Farbdifferenzen. Für die Auswertung der Bewertung *Rating* sollten idealerweise gleiche Farbdifferenzen  $\Delta E$  zugrunde liegen. Es wird daher versucht, die Bewertung für Lichtquelle 3 bei  $\Delta E_{LQ3} = \Delta E_{LQ1}$  zu rekonstruieren.

$$Rating_{LQ3,korrigiert} = Rating_{LQ3} - (R_{LQ3} - R_{LQ1})$$

Formel 5.4

Dazu werden für beide Lichtquellen für jedes Objekt aus der mittleren Farbdifferenz  $\Delta E$  mit Hilfe von Formel 5.2 Bewertungen  $R$  errechnet. Die Differenz der berechneten Bewertungen wird zu Korrektur von  $Rating_{LQ3}$  verwendet.  $Rating_{LQ3,korrigiert}$  ist in Abbildung 5.19 als gestrichelte Linie dargestellt.

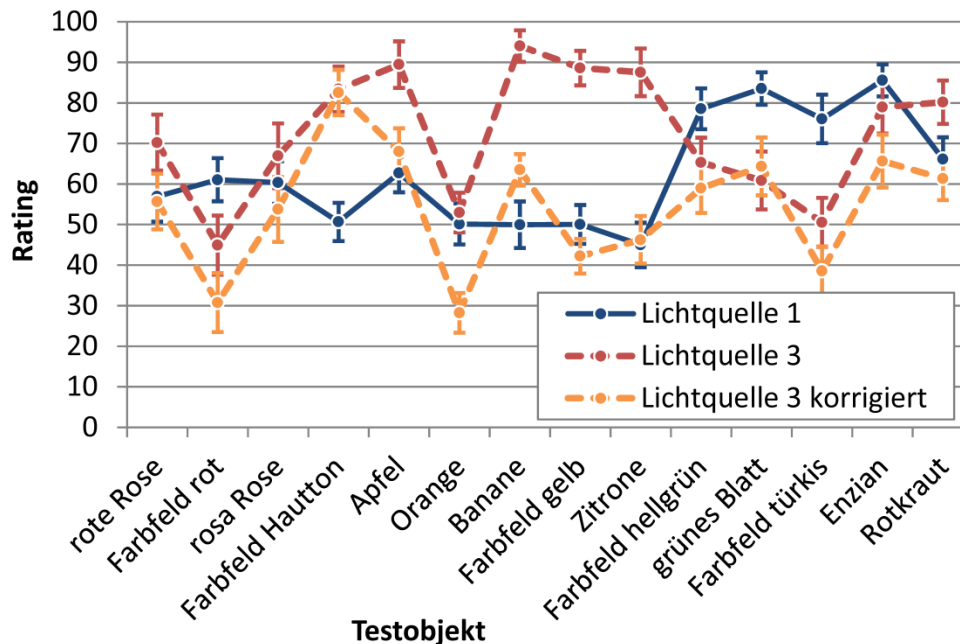


Abbildung 5.19: Visuelle Bewertungen Rating für Lichtquellen 1 und 3, gegliedert nach Bunttonwinkel der Testobjekte

Durch die Korrektur nähern sich die Bewertungen unter beiden Lichtquellen in einigen Bereichen einander an (Apfel, Banane, Farbfeld gelb, Zitrone), in anderen Bereichen unterscheiden sie sich stärker als vor der Korrektur (Orange, Farbfeld hellgrün, Farbfeld türkis, Enzian). Man kann nicht sagen, dass sich die Fehlerbalken (95%-Konfidenzintervalle) generell überlappen würden, weder mit noch ohne Korrektur. Die Bestimmtheitsmaße betragen zwischen  $Rating_{LQ1}$  und  $Rating_{LQ3}$   $R^2 = 0,14$  und zwischen  $Rating_{LQ1}$  und  $Rating_{LQ3,korrigiert}$   $R^2 = 0,04$ .

Insgesamt muss festgestellt werden, dass Ergebnisse für Lichtquelle 1 und Lichtquelle 3 nicht miteinander korrelieren. Trotz gleicher Beleuchtungsstärke, gleichem (visuell abgeglichenem) Farbort und gleichem  $R_a$ -Wert können Lichtquellen mit unterschiedlichen spektralen Verläufen verschiedene visuelle Farbunterschiede hervorrufen.

## 6 Anwendung: Farbwiedergabe mit LED

Bei der Beurteilung der Farbwiedergabe von Lichtquellen ist die semantische Bewertung in Kategorien hilfreich. So kann nun jedem (Farbwiedergabe-) Indexwert eine Bedeutung zugewiesen werden. Dieser Aspekt ist neuartig und kann die Kommunikation zwischen Lichtquellen-Herstellern, Leuchten-Herstellern und Endanwendern vereinfachen.

### 6.1 CIE CRI mit semantischen Kategorien

In Abschnitt 2.2.2 „CIE-Farbwiedergabeindex 1974/1995“ wird die Berechnung des aktuellen CIE Farbwiedergabeindex dargestellt. Wie aber soll ein berechneter Indexwert interpretiert werden? Was bedeutet z. B. ein  $R_a$ -Wert von 80?

Es bietet sich an, den in Abschnitt 5.2 „Kategorisierung der Farbdifferenz“ herausgearbeiteten Zusammenhang zwischen visueller Kategorie und messbarer Farbdifferenz zu nutzen, um eine Kategorisierung des bestehenden CIE CRI vorzunehmen.

Tabelle 6.1: Zuordnung zwischen visueller Kategorie und mittlerer Farbdifferenz

Kategorie	$\Delta E_{\text{CIECAM02-UCS}}$
ausgezeichnet	1,0
sehr gut	2,0
gut	3,2
mäßig	5,3
gering	6,3
schlecht	7,7
sehr schlecht	9,6

Zunächst müssen die im CIECAM02-UCS-Farbraum vorliegenden Farbdifferenzen in geeigneter Weise umgerechnet werden. Dazu wird in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Ebene für jede der 7 Kategorien (ausgezeichnet, sehr gut, usw.) ein Kreis um 8 Farbzentren auf der Planckschen Kurve gezogen ( $J' = 100$ ). Es handelt sich dabei um die Farbzentren des ANSI-Binning-Standards (2700 K, 3000 K, ..., 6500 K). Um die Berechnung zu vereinfachen, wird jeder Kreis durch acht gleichmäßig verteilte Punkte repräsentiert.



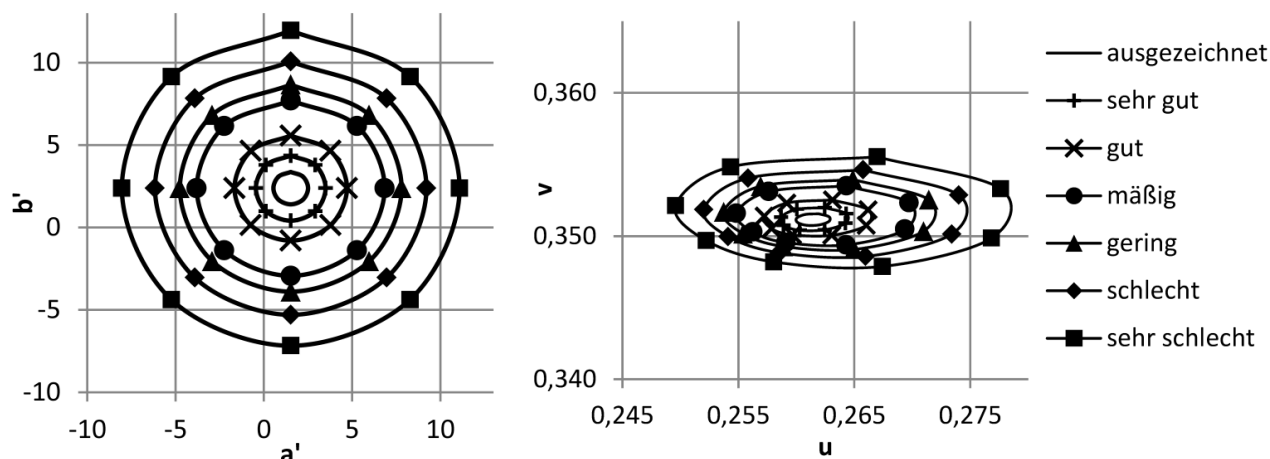


Abbildung 6.1: Darstellung der semantischen Kategorien für das 2700 K ANSI-Farbzentrum; links CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Ebene, rechts CIE 1960  $uv$ -Farbtabelle

Entsprechend der Berechnungsvorschrift (siehe Abschnitt 2.2.2 „CIE-Farbwiedergabeindex 1974/1995“) werden alle Punkte in die 1960  $uv$ -Farbtabelle umgerechnet, aus Kreisen sind nun verzerrte Konturen geworden. Die Parameter für die Umrechnung aus dem CIECAM02-UCS-Farbraum sind dabei  $L_A = 100 \frac{cd}{m^2}$ ;  $Y_B = \frac{1}{5} L_A = 20 \frac{cd}{m^2}$ ;  $F = 1$ ;  $c = 0,69$ ;  $N_C = 1$ . Aus den acht Punkten einer Kontur werden acht Farbdifferenzen zum Farbzentrum selbst (Zentrum der Kontur) gebildet ( $Y = 100$ ) und zu einem mittleren  $\Delta E$  zusammengefasst (Formel 2.15 bis Formel 2.21). Beispielhaft ist dies in Tabelle 6.2 für ein Farbzentrum und eine Kategorie dargestellt.

Tabelle 6.2: Beispielhafte Farbwerte für eine Kontur (Kategorie „sehr gut“, Farbzentrum 2700 K)

Farbzentrum	Kategorie	Richtung	$J'$	$a'$	$b'$	$\Delta E_{CIECAM02-UCS}$	$\Delta E_{U^*V^*W^*}$
2700 K	sehr gut	oben	100	1,5	4,4	2,0	1,7
2700 K	sehr gut	links-oben	100	0,1	3,8	2,0	2,0
2700 K	sehr gut	links	100	-0,5	2,4	2,0	3,5
2700 K	sehr gut	links-unten	100	0,1	1,0	2,0	3,3
2700 K	sehr gut	unten	100	1,5	0,4	2,0	1,7
2700 K	sehr gut	rechts-unten	100	2,9	1,0	2,0	1,6
2700 K	sehr gut	rechts	100	3,5	2,4	2,0	3,6
2700 K	sehr gut	rechts-oben	100	2,9	3,8	2,0	3,7
						Mittleres $\Delta E_{U^*V^*W^*}$ (CIE CRI 1995)	2,66

Abschließend werden aus den  $\Delta E_{U^*V^*W^*}$  nach Formel 2.9 die Werte für den CIE Farbwiedergabeindex berechnet (Tabelle 6.3). Bedingt durch die Konvertierung zwischen verschiedenen Farbräumen ergeben sich für Warmweiß und Kaltweiß unterschiedliche Werte, Unterschiede bestehen besonders bei mittleren und hohen Indexwerten.

Tabelle 6.3: Indexwerte des CIE Farbwiedergabeindex (1995)

	2700 K	3000 K	3500 K	4000 K	4500 K	5000 K	5700 K	6500 K
ausgezeichnet	93,9	93,9	94,0	94,3	94,7	95,2	95,8	96,2
sehr gut	87,8	88,0	88,4	89,0	89,6	90,2	90,8	91,6
gut	80,8	81,3	81,9	82,5	83,0	83,5	84,2	85,1
mäßig	68,6	69,0	69,4	69,8	70,2	70,6	71,2	72,1
gering	62,8	63,1	63,4	63,7	64,1	64,4	65,0	65,9
schlecht	53,9	54,0	54,2	54,4	54,6	54,8	55,4	56,2
sehr schlecht	41,2	41,2	41,1	41,1	41,1	41,3	41,7	42,5

Abbildung 6.2 fasst die Ergebnisse grafisch zusammen. Neben den Indexwerten der 7 Kategorien für drei Farbtemperaturen 2700 K, 4000 K und 6500 K sind zum Vergleich auch die Indexwerte aus dem Vorversuch zur Benennung der Kategorien („eigene“, siehe auch Kapitel 4) dargestellt.

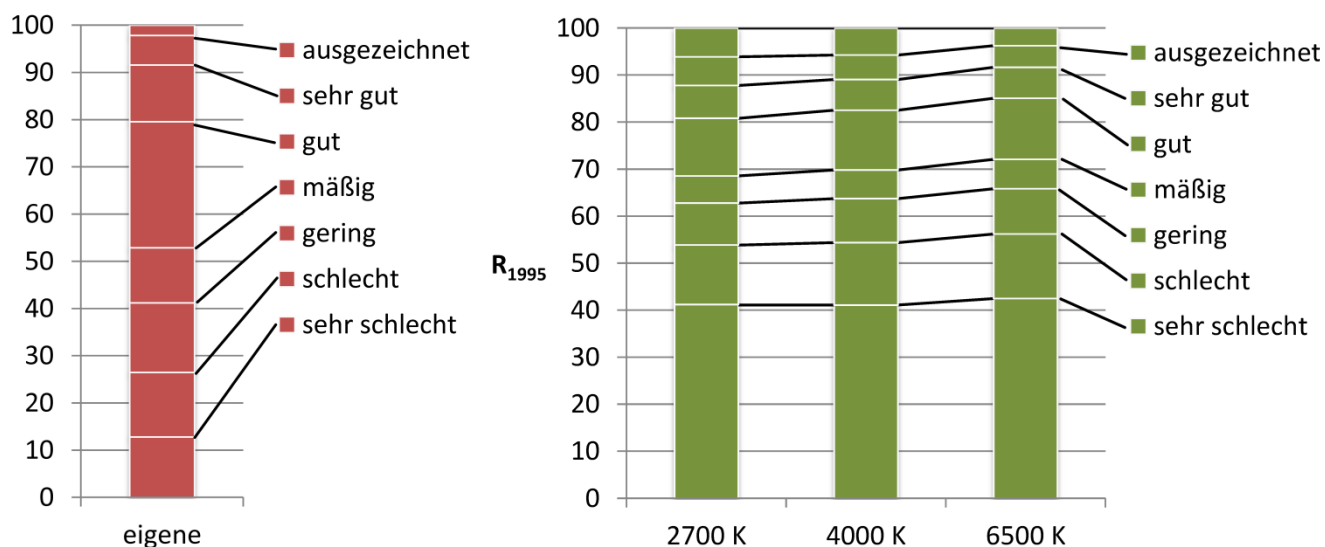


Abbildung 6.2: Vergleich Vortest-Skala (links, siehe Kapitel 4) und CIE CRI 1995 Indexwerte (rechts) für die 7 Kategorien

Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen der Verteilung der Kategoriebegriffe auf der 0-100-Skala im Vortest und den errechneten Verteilungen für die CRI-Skala. Während der Begriff „ausgezeichnet“ im Vortest dem Wert 98 zugewiesen wird, erhält er auf der CRI-Skala je nach Farbtemperatur einen niedrigeren Wert von 94 bis 96. Am anderen Ende wird „sehr schlecht“ einem CRI-Wert von ca. 42 zugewiesen (Vortest: 13). Im Vortest ist die Spreizung deutlich größer: Begriffe wie „ausgezeichnet“ und „sehr gut“ erhalten höhere Werte während „mäßig“, „gering“, „schlecht“ und „sehr schlecht“ im Vergleich zu CRI-Skala kleineren Werten zugewiesen werden.

Der für viele Normen zur Innenraumbeleuchtung relevante CRI-Wert von 80 entspricht einer „guten“ Übereinstimmung (Warmweiß) zwischen zwei Farbproben, im Kaltweiß-Bereich fällt die Kategorisierung etwas schlechter aus, d. h. der Wert 80 entspricht nur noch einer „guten“ bis „mäßigen“ Übereinstimmung. Im Neutral- bis Kaltweiß-Bereich kann durch eine Steigerung des

CRI-Wertes auf ca. 90 eine Verbesserung der Kategorie in „sehr gut“ erreicht werden. Mit einer weiteren Steigerung auf ca. 95 wird „ausgezeichnet“ erreicht.

## 6.2 CRI 2012 mit semantischen Kategorien

Die kategorisierte Bewertung von Farbdifferenzen kann auch auf die Berechnung des CRI 2012 angewendet werden. Eine Einführung in zum CRI 2012 mit Übersicht der Berechnungsschritte wurde in Abschnitt 2.2.8 gegeben.

Da der CRI 2012 auf Farbdifferenzen im CIECAM02-UCS-Farbraum basiert, ist eine Konvertierung zwischen verschiedenen Farbräumen nicht notwendig. Damit sind die errechneten Indexwerte unabhängig von der Farbtemperatur. Für die Berechnungen wird  $k = \frac{2}{45}$  sowie  $k = \frac{1}{55}$  angenommen – die derzeit gültigen (vorläufigen) Werte für die Berechnung des  $R_{a,2012}$  mit dem Real- bzw. HL17-Testfarbensatz. Zusätzlich wird der Wert  $k = \frac{1}{12}$  für bestmögliche Übereinstimmung mit dem eigenen Vortest verwendet.

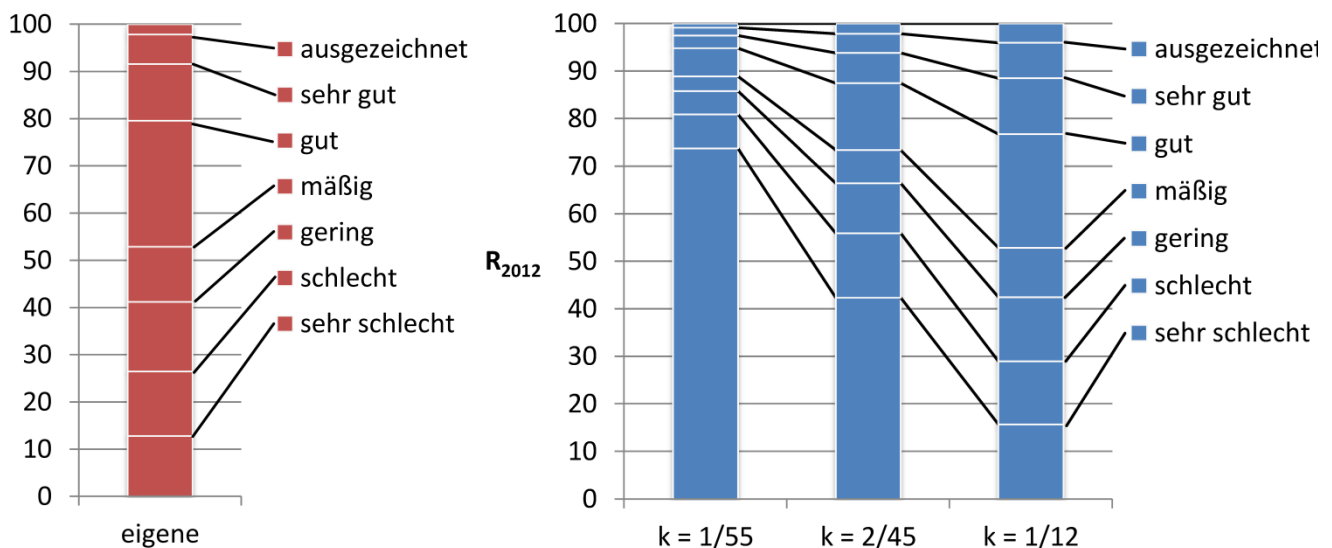


Abbildung 6.3: Vergleich Vortest-Skala (links) und CRI 2012 Indexwerte (rechts) für die 7 semantischen Kategorien

Interessanterweise kommen alle Kategorie-Begriffe sehr eng im oberen Teil der CRI 2012-Skala zu liegen – besonders mit dem zur Berechnung des allgemeinen Index  $R_{a,2012}$  empfohlenen Faktor  $k = \frac{1}{55}$  – selbst die Kategorie „sehr schlecht“ erreicht einen Indexwert von 73,7. Damit fallen auch alle Werte von 0 bis 73,7 in diese schlechteste Kategorie. Während schon die CIE CRI-Skala gegenüber der Vortest-Skala ein deutliches Zusammenrücken der Kategorie-Begriffe im oberen Wertebereich zeigt, ist dieser Effekt auf der CRI 2012-Skala noch deutlich ausgeprägter. Möglicherweise ist der erwähnte  $k$ -Faktor die entscheidende Ursache: Wird für die Berechnung  $k = \frac{2}{45}$  angenommen (der vorläufige Wert für den Real-Testfarbensatz), so wird die Kategorie „sehr schlecht“ auf den Wert 42,3 abgebildet und der Wert von 80 liegt zwischen den beiden Begriffen „gut“ und „mäßig“. Die Kategorie „ausgezeichnet“ erhält dann den Wert 97,8. Die Verteilung der

Kategorie-Begriffe auf der Skala entspricht erst mit dem selbst gewählten Faktor  $k = \frac{1}{12}$  weitestgehend der Wunschverteilung der Testpersonen im Vortest.

Tabelle 6.4: Indexwerte des Vortests (siehe Abschnitt 4) und des CRI 2012 ( $k = 1/55$ ,  $k = 2/45$  und  $k = 1/12$ )

Kategorie	$\Delta E_{CIECAM02-UCS}$	Vortest	CRI 2012		
			$k = \frac{1}{55}$	$k = \frac{2}{45}$	$k = \frac{1}{12}$
ausgezeichnet	0,98	97,9	99,1	97,8	95,9
sehr gut	1,97	91,6	97,5	93,8	88,5
gut	3,19	79,6	94,8	97,4	76,7
mäßig	5,32	52,9	88,9	73,4	52,9
gering	6,28	41,2	85,8	66,4	42,5
schlecht	7,69	26,5	80,9	55,9	29,0
sehr schlecht	9,56	12,8	73,7	42,3	15,7

Bleibt man aber beim derzeit empfohlenen Wert von  $k = \frac{1}{55}$ , so wird dem Skalenwert 80 die Kategorie „schlecht“ zugewiesen, 90 liegt zwischen „gut“ und „mäßig“, 95 bei „gut“ und die Kategorie „ausgezeichnet“ wird erst bei einem Indexwert von 99,0 erreicht. Es ist schon verwunderlich, dass eine Farbdifferenz  $\Delta E_{CIECAM02-UCS} = 3,0$  einen Indexwert von über 90 erreicht und ein  $\Delta E_{CIECAM02-UCS} = 5,0$  einen Indexwert von 90. Hier ist die grundlegende CRI 2012-Berechnungsmethodik in Bezug auf die angemessene Zuordnung von Farbdifferenz zu Indexwert zu hinterfragen.

---

## 7 Anwendung: LED-Binning

Für die Definition der heute verwendeten LED-Binninggruppen dienen vergrößerte MacAdam-Ellipsen als Grundlage, siehe dazu auch Abschnitt 2.3 ab Seite 52. Bei welchem Vergrößerungsfaktor kann von einer „ausgezeichneten“, „guten“, „mäßigen“ usw. Übereinstimmung zwischen dem wahrgenommenen Farbtort zweier Lichtquellen gesprochen werden? Es bietet sich an, den in Abschnitt 5.2 erarbeiteten Zusammenhang zwischen messtechnischer Farbdifferenz und wahrgenommenem kategorisiertem Farbunterschied zu nutzen. Diese Verknüpfung ist neuartig und ermöglicht eine intuitive Kommunikation zwischen Lichtquellen-Herstellern, Leuchten-Herstellern und Endanwendern.

---

### 7.1 ANSI/NEMA Binning-Standard mit semantischen Kategorien

---

Wie in Kapitel 6 beschrieben werden die experimentell ermittelten Zuordnungen von wahrgenommener Kategorie des Farbunterschiedes und mittlerer Farbdifferenz  $\Delta E_{CIECAM02-UCS}$  genutzt (siehe Tabelle 6.1 und Abschnitt 5.2). Es werden zwei Datenquellen miteinander verglichen:

1. Kreise in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel.  
Ein Kreis mit Radius  $\Delta u'v' = 0,001$  entspricht näherungsweise einer **SDCM**-Kontur (standard deviation of color matching) in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel und damit dem gängigen Maß einer unvergrößerten MacAdam-Ellipse.  $\Delta u'v' = 0,002$  ist entsprechend um Faktor 2 vergrößert usw. Damit wird die Vergleichbarkeit zum ANSI/NEMA Binning-Standard hergestellt (siehe auch Abschnitt 2.3.1 ab Seite 53).
2. Kreise in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene.  
Die Radien der Kreise orientieren sich an den experimentell ermittelten mittleren Farbdifferenzen für die semantischen Kategorien (siehe Tabelle 6.1). Für jede der sieben verwendeten **Kategorien** kann ein Kreis in der  $a'b'$ -Farbebene gezeichnet werden.

Für die Berechnungen werden die Kreise in den Farbtafeln durch je 8 gleichmäßig verteilte Punkte repräsentiert, siehe Abbildung 6.1. Die Farbwörter dieser Punkte werden in verschiedenen Farbtafeln berechnet:

- CIE 1931  $xy$ -Farbtafel,
- CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel,
- CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene.

Die Berechnungen werden für alle 8 Farbzentren des ANSI/NEMA Binning-Standards durchgeführt (2700 K, 3000 K, 3500 K, 4000 K, 4500 K, 5000 K, 5700 K, 6500 K). Abbildung 7.1 zeigt beispielhaft die Darstellung in der  $xy$ -Farbtafel für das Farbzentrum 4000 K. Im Anhang sind in Abschnitt 0 „LED-Binning“ ab Seite 153 alle Darstellungen enthalten.

Durch die Konvertierung der Farbräume sind die Kreise zu Konturen verzerrt worden. Dennoch sind Ähnlichkeiten in der Größe zwischen SDCM- und Kategorie-Konturen erkennbar. So entspricht für das Farbzentrum 4000 K eine unvergrößerte SDCM-Kontur ( $\Delta u'v' = 0,001$ ) in etwa der Kategorie „ausgezeichnet“, eine 2-fach vergrößerte SDCM-Kontur ( $\Delta u'v' = 0,002$ ) der Kategorie „sehr gut“ und eine 7-fache Vergrößerung ( $\Delta u'v' = 0,007$ ) einer „geringen“ Übereinstimmung zwischen zwei Farbproben.

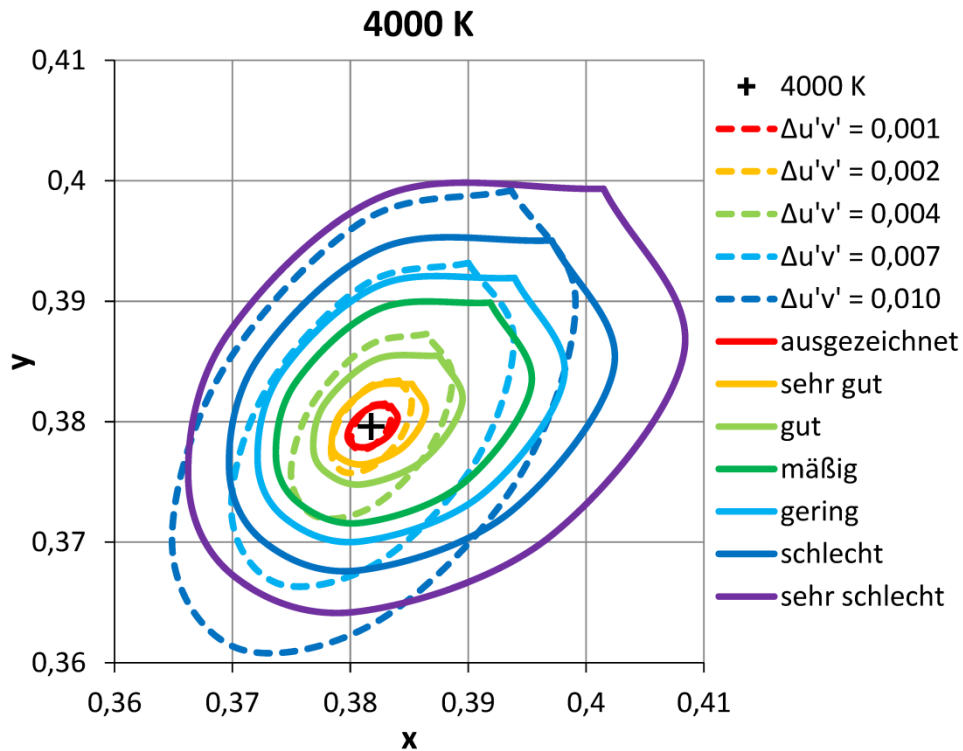


Abbildung 7.1: Darstellung der SDCM-Farbdifferenzen ( $\Delta u'v'$  konstant) und der mittleren Farbdifferenzen der 7 semantischen Kategorien in der CIE 1931  $xy$ -Farbtabelle, beispielhaft für das Farbzentrum 4000 K des ANSI/NEMA Binning-Standards

Für die Umrechnung zwischen den Farbräumen werden die Parameter  $Y = 100$  sowie  $L_A = 100 \frac{cd}{m^2}$ ,  $Y_B = \frac{1}{5} L_A = 20 \frac{cd}{m^2}$ ,  $F = 1,0$ ,  $c = 0,69$  und  $N_C = 1,0$  verwendet. Damit ergibt sich rechnerisch ein Adaptationsgrad von  $D = 0,941$ , der sich in der  $a'b'$ -Farbebene durch eine leichte Verschiebung der Farbzentren weg vom Unbuntpunkt  $a' = b' = 0$  äußert. Für die weiteren Berechnungen werden alle Konturen auf  $a' = b' = 0$  zentriert.

Da die Form der Konturen bei Darstellung in der  $xy$ -Farbtabelle allein von der Verzerrung durch die Konvertierung zwischen verschiedenen Farbräumen abhängt – d. h. keinen substanziellen Beitrag bei der Beurteilung der Farbdifferenzen liefert – werden die Farbdifferenzen der 8 Konturen-Stützpunkte zum Farbzentrum (Zentrum der Kontur) für die folgenden Darstellungen zu einem Mittelwert zusammengefasst. Abbildung 7.2, Abbildung 7.3 und Abbildung 7.4 zeigen die Ergebnisse für die drei untersuchten Farbtabelle.

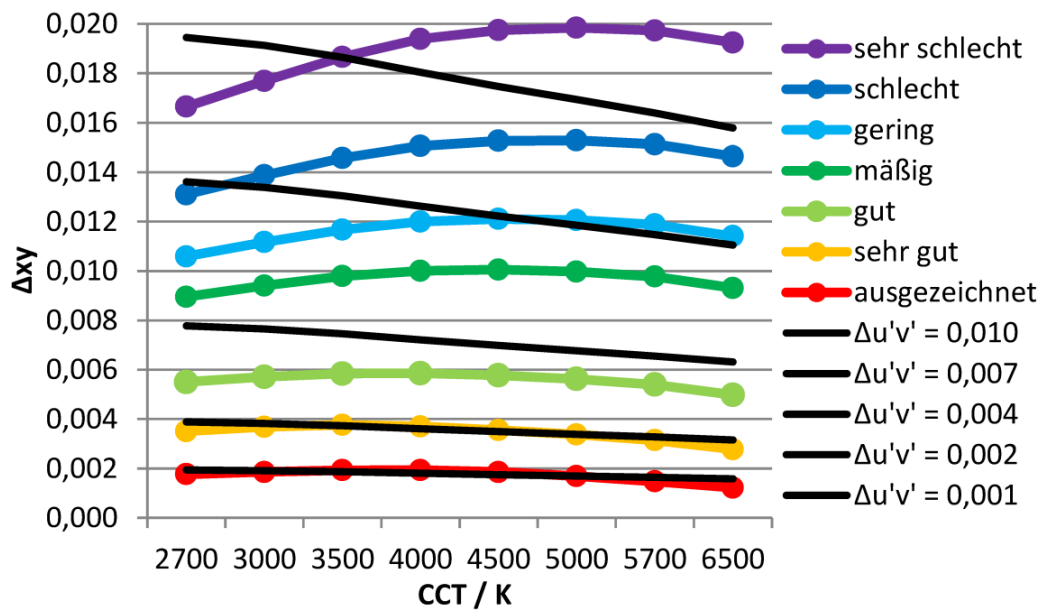


Abbildung 7.2: Vergleich der mittleren Farbdifferenzen  $\Delta xy$  (CIE 1931) für SDCM-Farbdifferenzen und semantische Kategorien

In den drei Abbildungen werden die mittleren Werte für die 7 Kategorien farbig dargestellt, die mittleren SDCM-Werte für die Vergrößerungsfaktoren 1, 2, 4, 7 und 10 in Schwarz. SDCM- und Kategoriewerte zeigen einen unterschiedlichen Verlauf über die Farbtemperatur CCT, dies ist in der Beschaffenheit der zugrunde liegenden Farbräume begründet. Da CIECAM02-basierte Farbräume als visuell gleichabständiger gelten als die CIE 1931  $xy$ - oder die CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafeln (siehe dazu auch Abschnitt 3.4) wird die Interpretation anhand von Abbildung 7.4 vorgenommen.

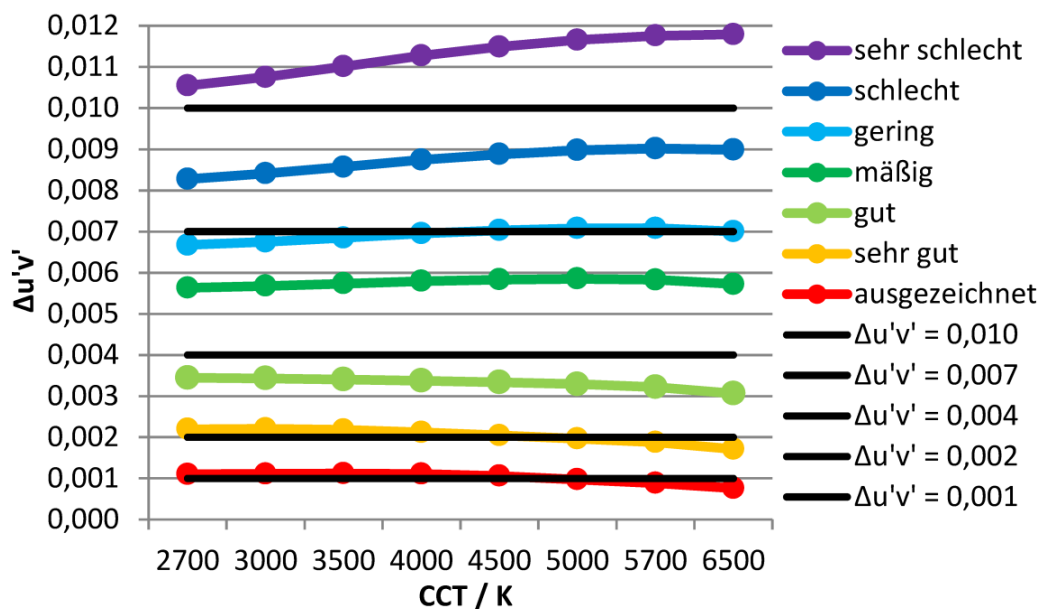


Abbildung 7.3: Vergleich der mittleren Farbdifferenzen  $\Delta u'v'$  (CIE 1976) für SDCM-Farbdifferenzen und semantische Kategorien

Für die von der CIE empfohlene Beobachtungsbedingung ( $CCT = 6500\text{ K}$ ) werden folgende Zusammenhänge festgestellt:

- Die Kategorie „ausgezeichnet“ entspricht näherungsweise der SDCM-Farbdifferenz ( $\Delta u'v' = 0,001$ ).
- Die Kategorie „sehr gut“ entspricht näherungsweise einer Farbdifferenz von  $\Delta u'v' = 0,002$ .
- $\Delta u'v' = 0,004$  entspricht einer Kategorisierung zwischen „gut“ und „mäßig“.
- $\Delta u'v' = 0,007$  entspricht einer „geringen“ Übereinstimmung zwischen zwei Farbproben.
- $\Delta u'v' = 0,010$  entspricht einer Kategorisierung zwischen „schlecht“ und „sehr schlecht“.

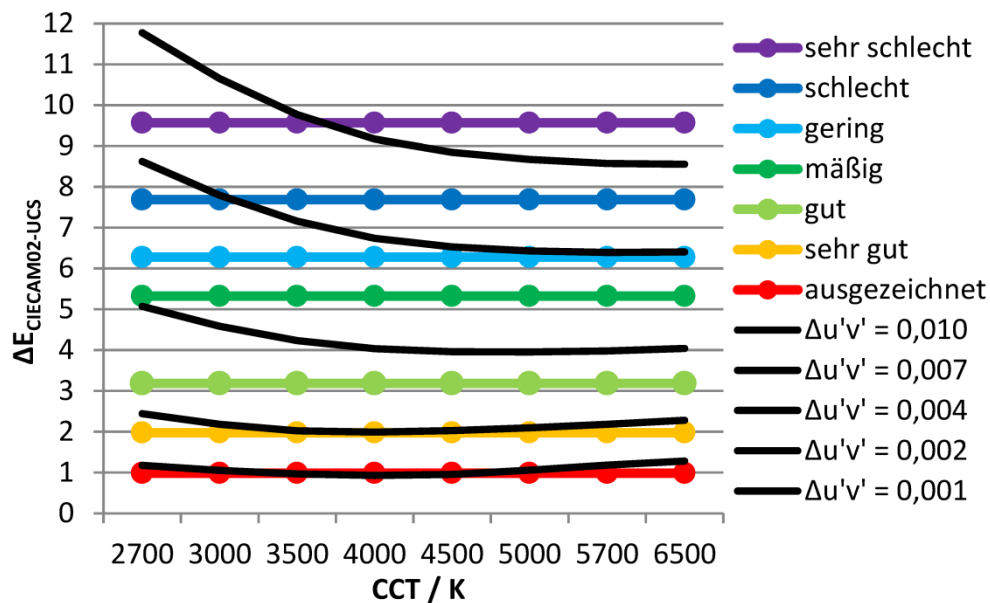


Abbildung 7.4: Vergleich der mittleren Farbdifferenzen  $\Delta E$  (CIECAM02-UCS) für SDCM-Farbdifferenzen und semantische Kategorien

Der ANSI/NEMA Binning-Standard orientiert sich bei der Definition der Binninggruppen an SDCM-Konturen, die um den Faktor 7 vergrößert wurden ( $\Delta u'v' = 0,007$ ). Diese Definition entspricht bei kaltweißen Farbtemperaturen einer „geringen“ visuellen Übereinstimmung zweier Farbproben, im Warmweiß-Bereich sogar nur einer „schlechten“ bis „sehr schlechten“ Übereinstimmung. Im Standard werden zusätzlich „1/4 Bins“ ( $\Delta u'v' = 0,004$ ) und „1/16 Bins“ ( $\Delta u'v' = 0,002$ ) definiert, sie entsprechen einer „guten“ bis „mäßigen“ Übereinstimmung (1/4 Bin) bzw. einer knapp „sehr guten“ Übereinstimmung (1/16 Bin). Eine „ausgezeichnete“ Übereinstimmung wird von keiner der ANSI/NEMA Binninggruppen erreicht.



## 7.2 Vergleich mit anderen Forschungsergebnissen

Auf die experimentellen Ergebnisse von Bieske [61] wurde schon in Abschnitt 2.1.6 eingegangen. Die Autorin verwendet die visuellen Kategorien „gerade erkannt“, „sicher gesehen“ und „störend empfunden“ und unterscheidet nach Variation entlang der Planckschen Kurve und entlang der Juddschen Geraden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.5 dargestellt. Die gepunkteten Linien zeigen die Ergebnisse für „gerade erkannt“, kurz gestrichen „sicher erkannt“ und lang gestrichen „störend empfunden“.

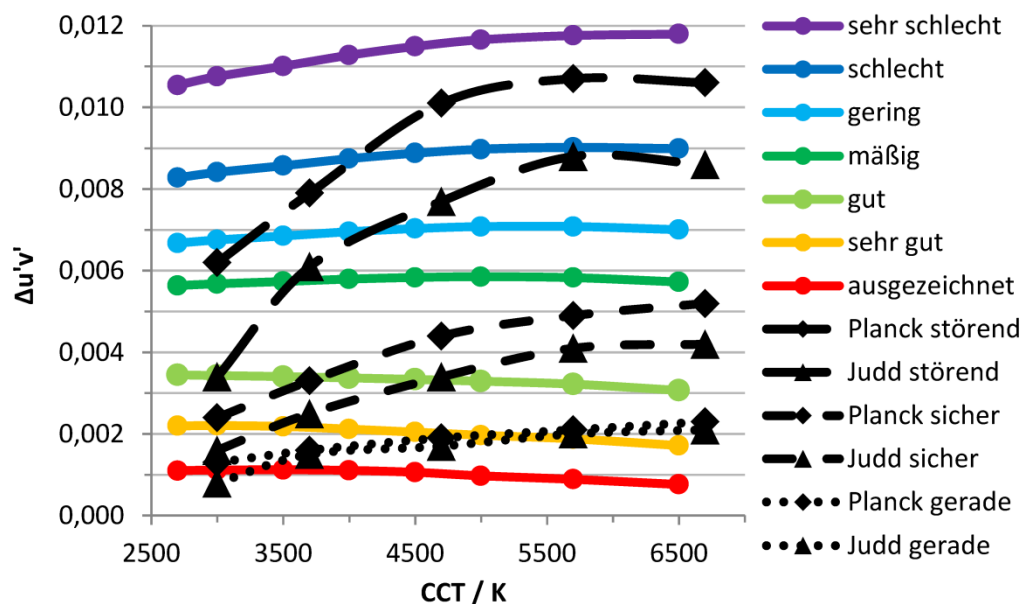


Abbildung 7.5: Kategorisierte Bewertung und Wahrnehmbarkeit von sprunghaften Farbveränderungen entlang des Planckschen Kurvenzuges und entlang der Juddschen Geraden nach Bieske [61]

Auffällig ist, dass nach Bieske ein starker Warmweiß-Kaltweiß-Unterschied besteht. Im Warmweiß-Bereich (3000 K) reagieren die Probanden – ausgedrückt als  $\Delta u'v'$  – um etwa den Faktor zwei empfindlicher als im Kaltweiß-Bereich (6700 K). Dies betrifft alle drei Kategorien.

Tabelle 7.1: Vergleich der visuellen Kategorien nach Bieske [61] mit den eigenen Ergebnissen

Kategorie nach Bieske	entspricht Kategorie der eigenen Experimente	
	Warmweiß (3000 K)	Kaltweiß (6500 K)
gerade erkannt	ausgezeichnet	sehr gut, Tendenz zu gut
sicher gesehen	sehr gut	gut bis mäßig
störend empfunden	gute bis geringe Übereinstimmung	schlecht bis sehr schlecht

Harbers et. al. [59] lässt Probanden den empfundenen Farbunterschied zwischen LEDs mit fest eingestellter Farbdifferenz beschreiben (siehe dazu auch Abschnitt 2.3.3 ab Seite 55). Tabelle 7.2 zeigt den Vergleich mit den eigenen Ergebnissen (umgerechnet in die CIE 1960  $uv$ -Farbtafel). Es

fällt auf, dass die Bewertung größerer Farbdifferenzen ( $\Delta uv \approx 0,006$ ) mit „nicht akzeptabler Farbunterschied“ bzw. „geringe Übereinstimmung“ qualitativ sehr ähnliche Aussagen enthält, die Bewertung kleinerer Farbdifferenzen ( $\Delta uv = 0,001$  und  $\Delta uv = 0,002$ ) aber im Ergebnis von Harbers et. al. sehr kritisch ausfällt. Es wird hier ein Zusammenhang mit der farbmtrischen Bewertung vermutet – Harbers et. al. verwendet den CIE 1931 2°-Normalbeobachter bei visuell deutlich größerem Beobachtungsfeld – der im Ergebnis dazu führt dass farbmtrisch gleiche Farbörter nicht visuell gleich erscheinen.

Tabelle 7.2: Vergleich der Bewertung nach Harbers et. al. [59] mit den eigenen Ergebnissen, Warmweiß 3000 K

Harbers		Eigene Experimente	
$\Delta uv$	Bewertung	$\Delta uv$	Bewertung
0,001	wahrnehmbarer, aber akzeptabler Farbunterschied	0,001	ausgezeichnet
0,002	wahrnehmbarer Farbunterschied, nicht akzeptabel in der Architektur- und Akzentbeleuchtung	0,002	sehr gut
0,006	nicht akzeptabler Farbunterschied	0,0062	geringe Übereinstimmung

Kraushaar [157] bezeichnet CIEDE2000-Farbdifferenzen von 0,5...1 für die Praxis in der grafischen Industrie als „sehr kleine Abweichung, nur von einem geschulten Auge zu erkennen“ (siehe Tabelle 2.4). Dies würde in den vorliegenden experimentellen Ergebnissen der Kategorie „ausgezeichnet“ entsprechen. Farbdifferenzen von 1...2 („ausgezeichnet“ ... „sehr gut“) werden als „mittlere Abweichung, auch von einem ungeschulten Auge erkennbar“ bezeichnet. Der Bereich von 2...4 („gut“) wird als „deutliche Abweichung“ benannt, ab einer Farbdifferenz von 4 („mäßig“ und schlechter) dann „starke Abweichung“.

Der ABCS Binning-Standard (siehe Abschnitt 2.3.2) verwendet als Kantenlänge der Binninggruppen den Wert  $\Delta u'v' = 0,002$  [129]. Damit sind innerhalb eines Bins maximale Farbabweichungen der Kategorie „sehr gut“ zu erwarten. Die Definition der Binninggruppen stellt damit nicht sicher, dass zwei LEDs aus einer Gruppe eine „ausgezeichnete“ Übereinstimmung aufweisen.

---

## 8 Diskussion und Ausblick

In dieser Arbeit werden die durchgeführten Probandenversuche in zwei Richtungen ausgewertet:

1. Farbwiedergabe (Kapitel 6)
2. LED-Binning (Kapitel 7)

---

### 8.1 Diskussion zur Farbwiedergabe

---

Hier sollen mehrere Punkte diskutiert werden; einschließlich einer Farbraumempfehlung, Problemen bei der Beobachtung kleiner Farbdifferenzen und der geeigneten Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Farbdifferenz und empfundenem Farbunterschied.

#### Farbraum

Die durch Probanden visuell bewerteten Farbunterschiede werden am besten durch Farbdifferenzen auf Basis der  $u'v'$ -Farbtafel oder der CIECAM02-Varianten –LCD, -SCD oder –UCS beschrieben. Gegenüber der  $u'v'$ -Farbtafel stellen die CIECAM02-Varianten vollständige Farbräume (inkl. Helligkeitsdimension) dar und berücksichtigen Beobachtungsbedingungen wie Umfeldleuchtdichte und chromatische Adaptation. Daher wird die  $u'v'$ -Farbtafel für die weitere Verwendung nicht empfohlen.

Die Wahl innerhalb der CIECAM02-Varianten fällt aus Gründen der praktischen Verwendbarkeit auf CIECAM02-UCS – es ist keine Unterscheidung in große und kleine Farbdifferenzen notwendig, die Korrelation mit den visuellen Farbunterschieden liegt zusammen mit den anderen CIECAM02-Varianten auf einem gemeinsamen hohen Niveau (siehe Abschnitt 3.4).

Für die Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen ist es notwendig die CIECAM02-Parameter wie die mittlere Leuchtdichte des Adaptationsfeldes  $L_A$ , die mittlere Leuchtdichte der gesamten Szene  $Y_B$  sowie die Umgebungsparameter  $F$ ,  $c$  und  $N_c$  auf pauschale Werte festzulegen. Bei der Durchführung von Probandenversuchen werden diese Parameter gemessen, damit kann das CIECAM02-Modell die konkrete Beobachtungssituation berücksichtigen. Bei der Verwendung von CIECAM02 in einem Farbwiedergabeindex müssen aber feste Werte verwendet werden, eine Messung im Einzelfall ist nicht möglich.

Üblich ist die Verwendung der Parameter  $F = 1$ ,  $c = 0,69$  und  $N_c = 1$  (durchschnittliche helle Umgebung),  $Y_B = \frac{1}{5} L_A$  und die Festsetzung auf  $L_A = 100 \frac{cd}{m^2}$ . Diese Werte werden beispielsweise für die Berechnung des CRI 2012 gewählt und beschreiben die erwarteten Beobachtungsbedingungen für die Anwendung des Farbwiedergabeindex.

## Chromatische Adaptation

Interessant ist aber, dass die CIECAM02-interne Berechnung bei den oben genannten Parametern einen Grad der Adaptation von  $D = 0,94$  ergibt, also keine vollständige Adaptation. Bei der weiteren Berechnung im CIECAM02-UCS-Farbraum werden entsprechend für unbunte Testfarben Farbörter neben der Unbuntachse errechnet ( $a' \neq 0$ ,  $b' \neq 0$ ). In der CRI 2012-Berechnungsvorschrift werden Probleme dieser Art umgangen indem der Grad der Adaptation  $D$  per Definition auf den Wert 1,0 gesetzt wird, was einer vollständigen Adaptation auf das Adaptationsfeld entspricht.

## Beleuchtungsmetamerie und die niedere Farbmatrik

Neben der möglicherweise unvollständigen chromatischen Adaptation (siehe Oicherman [158]) gibt es eine weitere Ursache für die Beobachtung, dass Testfarben trotz messtechnisch gleicher Farbörter (XYZ-Werte stimmen überein,  $\Delta E = 0$ ) visuell unterschiedlich erscheinen können. Die Ursache dafür sind die zugrunde liegenden Normspektralwertfunktionen, die nicht exakt die spektralen Bewertungsfunktionen des Probanden in der konkreten Beobachtungssituation (abhängig von Adaptationszustand, Beobachtungsfeldgröße usw.) abbilden. Bei Beleuchtung mit verschiedenartigen Spektren – wie in den eigenen Versuchen geschehen – kommen diese Effekte zum Tragen (Beleuchtungsmetamerie).

Da die höhere Farbmatrik (z. B. CIECAM02) auf der niederen Farbmatrik (CIE Normalbeobachter) aufbaut, können auch Farbörter im CIECAM02-Farbraum von der Diskrepanz zwischen messtechnischer und visueller Gleichheit betroffen sein [54] [159]. Als Abhilfe werden in den eigenen Versuchen alle Lichtquellen visuell und nicht messtechnisch auf Gleichheit abgeglichen. Dennoch kann es prinzipbedingt auch bei gleicher Beleuchtungsstärke, gleichem (visuellem) Farbort und gleichem  $R_a$ -Wert zweier Lichtquellen bei verschiedenartigem spektralen Verlauf zu Unterschieden in der visuellen Beurteilung farbiger Objekte kommen.

## Beschreibung durch lineare Funktion

Werden die Ergebnisse des Tabletop-Versuches durch eine lineare Funktion angenähert, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit Ergebnissen von Li et. al. [66] und Söllner [160].

Tabelle 8.1: Vergleich des Zusammenhanges zwischen Farbdifferenz und visuellem Farbunterschied

Quelle	Beschreibende Funktion
Söllner [160]	$R = 100 - 6,4 \cdot \Delta E$
Li et. al. [66]	$R = 100 - 8,0 \cdot \Delta E$
Eigener Tabletop-Versuch	$R = 100 - 8,7 \cdot \Delta E$

---

Die im CIE CRI implementierte Funktion ( $R = 100 - 4,6 \cdot \Delta E$ ) weist dagegen eine geringere Steigung auf, d. h. hier werden messtechnisch gleiche Farbdifferenzen im Vergleich zu den drei oben genannten Funktionen besser bewertet. Die gleiche Tendenz zeigt sich auch für den CRI 2012 (siehe Abschnitt 5.2.1). Durch diese Charakteristik von CIE CRI und CRI 2012, im Vergleich zu den eigenen Tabletop-Ergebnissen selbst relativ großen Farbdifferenzen noch recht hohe Bewertungen zuzuordnen, finden sich auch die eigenen Kategorie-Begriffe bei der Übertragung auf die CIE CRI- bzw. CRI 2012-Skala bei erstaunlich hohen Indexwerten wieder (siehe Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3). Für diese Berechnungen wurden die mit den Kategorien verknüpften Farbdifferenzwerte mit den jeweiligen Metriken in Indexwerte umgerechnet. Bewertungsfunktionen mit geringer Steigung führen somit zu hohen Indexwerten auch der unteren Kategorien wie „schlecht“ und „sehr schlecht“. Besonders das extreme Verhalten des CRI 2012 wird vom Autor kritisch gesehen – hier sollte der Faktor  $k = \frac{1}{55}$ , der derzeit für die Berechnung des  $R_{a,2012}$  mit dem HL17-Testfarbensatz empfohlen wird, kritisch untersucht werden. Khanh et. al. [62] verwendet in eigenen Berechnungen den Faktor  $k = \frac{2}{45}$ , der an eigene experimentelle Ergebnisse angepasst wurde.

## Beschreibung durch S-förmige Funktion

Die zur Verknüpfung von berechneter Farbdifferenz und visuellem Farbunterschied im Tabletop-Versuch gewählte S-förmige Gauss-Funktion erfüllt einerseits die gestellten formalen Anforderungen (monoton fallend; invertierbar; Maximalwert Bewertung  $R = 100$  bei Farbdifferenz  $\Delta E = 0$ ), andererseits spiegelt sie auch die Erfahrungen aus den Experimenten wider: Sehr kleine Farbdifferenzen können von Probanden nur schwer unterschieden werden während große Farbdifferenzen in vielen Anwendungen eine untergeordnete Rolle spielen. Der dazwischen liegende Bereich kleiner und mittlerer Farbdifferenzen ist von großer praktischer Bedeutung und sollte die größte Gewichtung erhalten. Entsprechend weist die gefundene S-förmige Funktion in diesem Bereich die größte Steigung auf. In ihrer Form weist die gefundene Funktion große Ähnlichkeit zur S-förmigen Bewertungsfunktion des CRI 2012 auf (siehe Abbildung 2.30 und Abbildung 5.9).

## Kategorisierte Beschreibung

Wird die Beschreibung von Farbdifferenzen in Kategorien auf die Berechnungsvorschrift für den CIE CRI angewandt, so erhält man eine Abbildung der Kategorie-Begriffe auf die CIE CRI-Skala (siehe Abbildung 6.2). Bedingt durch die Transformation zwischen CIECAM02-UCS und CIE 1960  $uv$ -Farbtafel sind die errechneten Werte abhängig von der Farbtemperatur. Für Warmweiß (2700 K) entspricht der in der Innenraumbeleuchtung relevante Wert von  $R_a = 80$  der Kategorie „gut“, für kaltweiße Lichtquellen liegt er etwas schlechter zwischen „guter“ und „mäßiger“ Bewertung. Im Neutral- bis Kaltweiß-Bereich kann durch eine Steigerung auf ca.  $R_a = 90$  eine Verbesserung der Kategorie in „sehr gut“ erreicht werden. Mit einer weiteren Steigerung auf ca.  $R_a = 95$  wird für alle Farbtemperaturen „ausgezeichnet“ erreicht.

---

Die CRI 2012-Metrik dagegen erweist sich wie oben beschrieben als sehr unkritisch – auch vergleichsweise große Farbdifferenzen führen noch zu relativ hohen Indexwerten (siehe Abbildung 6.3). Entsprechend wird die Kategorie „schlecht“ auf einen Indexwert von  $R_{2012} = 80$  abgebildet,  $R_{2012} = 90$  ist mit „mäßig“ verknüpft und  $R_{2012} = 95$  mit „gut“. Die höchste Kategorie „ausgezeichnet“ wird erst mit  $R_{2012} = 99$  erreicht. Wie oben beschrieben muss aus Sicht des Autors dringend die CRI 2012-Metrik, insbesondere der Wert der Konstante  $k$  hinterfragt werden. Mit Wahl von  $k = \frac{1}{12}$  können die Kategoriebegriffe auf sinnvolle Indexwerte skaliert werden.

---

## 8.2 Diskussion zum LED-Binning

---

Einige Details in den Beobachtungsbedingungen machen die eigenen Untersuchungen zu idealen Versuchen in Richtung Farbwiedergabe:

- Die Probanden haben die Erscheinung *farbiger* Objekte bewertet. Weiße oder graue Objekte wurden nicht getestet.
- Die Farberscheinung wurde unter zwei verschiedenen Beleuchtungsspektren miteinander verglichen (Halogenlampe und LED-Mischung).

### Beobachtungsbedingungen

Diese Beobachtungsbedingungen stellen nicht die ideale Ausgangsbasis zum Thema Binning dar. Hierfür wären Versuche mit unbunten Oberflächenfarben bzw. Selbstleuchtern ideal und die spektrale Verteilung der zu vergleichenden Samples sollte annähernd gleich sein um ungewollte Verfälschungen durch Beleuchtungsmetamerie und unvollständige Adaptationsprozesse zu vermeiden. Die Anwendung der ermittelten Ergebnisse auf das Thema Binning stellt also in dieser Hinsicht einen Kompromiss dar und die oben beschriebenen Probleme durch Beleuchtungsmetamerie und unvollständige Adaptation treffen damit auch hier zu.

Auch die Größe des Sehfeldes spielt für die Wahrnehmung eine Rolle. Während viele Experimente zur Farbwiedergabe mit  $2^\circ$  oder  $4^\circ$  großen Sehfeldern arbeiten, wäre für das Thema Binning eine Sehfeldgröße von  $10^\circ$  oder mehr wünschenswert [59]. Damit einhergehend muss auch die farbmetrische Bewertung angepasst werden. Der CIE 1931  $2^\circ$  Normalbeobachter muss durch den CIE 1964  $10^\circ$ -Normalbeobachter oder ähnliche, angepasste Bewertungsfunktionen ersetzt werden. Korrekturen an den Normspektralwertfunktionen – insbesondere im blauen Spektralbereich – werden diskutiert. Für die Auswertung der eigenen Untersuchungen zum Thema Binning würden die CIE 1964  $10^\circ$ -Normspektralwertfunktionen benutzt.

Des Weiteren wurde in den Experimenten zwischen Lichtquellen umgeschaltet, die zu vergleichenden Objekte wurden also sequenziell und nicht simultan betrachtet. Die für das Binning relevante Beobachtungsbedingung wäre aber die simultane Betrachtung. Allerdings zeigen Untersuchungen von Fotios und Cheal [161] zum Brightness-Matching, dass es keinen Unterschied zwischen sequenzieller und simultaner Betrachtung gibt.

Über ein weiteres Detail der Beobachtungsbedingungen muss im Zusammenhang mit Binning diskutiert werden: Bei vielen Experimenten mit simultaner Betrachtung wird eine harte Kante und kein weicher Übergang zwischen beiden Vergleichsreizen präsentiert. Binning-relevanter wäre aber ein weicher Verlauf zwischen beiden Stimuli [59]. Mit einer harten Kante sind kleine Farbdifferenzen leichter wahrzunehmen, entsprechend ist mit einer kritischen Bewertung zu rechnen.

### 8.3 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen empfundenem Farbunterschied und gemessener Farbdifferenz hergestellt und damit das Probandenurteil auf messtechnischem Weg vorhergesagt werden kann (Ziel 1, siehe Seite 1). Der gefundene Zusammenhang ist unabhängig von Art und Farbsättigung der Testobjekte sowie von der Farbtemperatur der beleuchtenden Lichtquelle. Er ist weitgehend unabhängig vom Buntton der Testobjekte (bestätigt These B). Die gefundene Formel ist invertierbar und erlaubt es Berechnungen in beide Richtungen durchzuführen: Es können sowohl Farbunterschiede (Probandenurteile) zu gemessenen Farbdifferenzen als auch Farbdifferenzwerte zu Farbunterschieden (z. B. Mittelwerte und Grenzwerte der Kategorien) berechnet werden.

Tabelle 8.2: Semantische Kategorien mit zugeordneten Werten auf der Bewertungsskala  $R$  sowie Farbdifferenzen  $\Delta E$

Kategorie	$R$	$\Delta E_{CIECAM02-UCS}$
ausgezeichnet	97,9	1,0
sehr gut	91,6	2,0
gut	79,6	3,2
mäßig	52,9	5,3
gering	41,2	6,3
schlecht	26,5	7,7
sehr schlecht	12,8	9,6

Als Grundlage zur farbmtrischen Beschreibung der empfundenen Farbunterschiede wird der Farbraum CIECAM02-UCS empfohlen. Wenn für die Anwendung die Komplexität von CIECAM02 unerwünscht sein sollte, so liefert auch die  $u'v'$ -Farbtafel gute Ergebnisse (These C bestätigt). Bei der Durchführung von Experimenten zur Wahrnehmung von überschwelligen Farbreizen führt die Verankerung der visuellen Antworten mit Hilfe einer Graukarte tatsächlich zur erwarteten Verbesserung der Korrelation zwischen empfundenem Farbunterschied und gemessener Farbdifferenz (These D bestätigt).

Weiter wird in dieser Arbeit gezeigt, dass die Beschreibung der empfundenen Farbdifferenzen mit Hilfe von Ankerbegriffen (semantischen Kategorien) sowohl für die Anwendung in der Farbwiedergabe als auch für das Binning sinnvoll ist. Auf einer Bewertungsskala (z. B. eine Intervallskala mit den Endpunkten „0“ und „100“) sollte die Anordnung der Begriffe



---

wahrnehmungsgemäß erfolgen. Die Anordnung ist damit nicht zwangsläufig gleichabständig (Ziel 2 und Ziel 3).

Bei der Untersuchung des CRI 2012 (Ziel 4) wird eine deutliche Abweichung der Skalierungsfunktion sowohl zwischen CRI 2012 und den eigenen experimentellen Ergebnissen als auch zwischen CRI 2012 und den Ergebnissen anderer Forscher festgestellt (siehe dazu Abschnitte 6.2 und 8.1). Die im CRI 2012 vorgesehene Funktion weist eine geringe Steigung auf, dies führt zu vergleichsweise hohen Indexwerten trotz großer Farbdifferenzen. Eine sinnvolle Skalierung der CRI 2012-Werte findet mit Wahl einer deutlich größeren Steigung ( $k = \frac{1}{12}$ ) statt.

Zur Erreichung von Ziel 5 werden die semantischen Kategorien auf den ANSI/NEMA Binning-Standard angewendet. Er definiert die Größe eines vollen Bins mit  $\Delta u'v' \approx 0,007$ . Dieser Wert entspricht für Lichtquellen mit  $CCT > 4000\text{ K}$  einer „geringen“ visuellen Übereinstimmung und für Lichtquellen mit  $CCT < 3500\text{ K}$  sogar nur einer „schlechten“ bis „sehr schlechten“ Übereinstimmung. Weiterhin sieht der Standard „1/4 Bins“ ( $\Delta u'v' \approx 0,004$ ) und „1/16 Bins“ ( $\Delta u'v' \approx 0,002$ ) vor, sie entsprechen „guter“ bis „mäßiger“ Übereinstimmung (1/4 Bin) bzw. einer „sehr guten“ Übereinstimmung (1/16 Bin). Eine „ausgezeichnete“ Übereinstimmung wird von keiner der ANSI/NEMA Binninggruppen erreicht, hierzu wäre eine Einschränkung auf  $\Delta u'v' \approx 0,001$  notwendig. Dies deckt sich mit den Ergebnissen anderer Forschergruppen.

---

## 8.4 Anregungen für zukünftige Arbeiten

---

Für zukünftige Arbeiten zur Farbwahrnehmung sollte das CIECAM02-Modell für die colorimetrische Beschreibung eingesetzt werden. Zum einen bietet es von allen verfügbaren Farbräumen die beste Gleichabständigkeit, zum anderen ist darin eine leistungsfähige Formel zur chromatischen Adaptation enthalten. Gleichwohl baut es auf der niederen Farbmeterik (CIE-Normalbeobachter) auf, womit einige ungelöste Probleme verbunden sind. Hier seien die Stichpunkte Beleuchtungsmetamerie und interpersonelle Streuung genannt.

Für die Anwendung für das Binning von Lichtquellen sind visuelle Experimente mit spektral sehr ähnlichen Lichtquellen empfehlenswert. So können störende Effekte aufgrund von Beleuchtungsmetamerie vermieden werden (siehe Abschnitt 5.4). In den durchgeführten Experimenten kamen aber spektral z. T. sehr unterschiedliche Lichtquellen zum Einsatz (ideal für Untersuchungen zur Farbwiedergabe). Außerdem sollte verstärkt der Frage nachgegangen werden, inwiefern die chromatische Adaptation der Versuchsperson bei der Bildung des Urteils abgeschlossen ist. Modelle wie CIECAM02 gehen von einem statischen Zustand aus (d. h. sie enthalten keine Zeitkonstanten) – im Experiment ist das eventuell nicht der Fall. Bei der Anwendung der kategorisierten Beschreibung auf den Farbwiedergabeindex CRI 2012 treten Probleme bei der Skalierung hervor – hier ist weitere Forschung notwendig. Ebenso sinnvoll ist eine Übertragung der kategorisierten Beschreibung auf den englischen Sprachraum. Alle Probandenexperimente in dieser Arbeit wurden in deutscher Sprache durchgeführt. Inwieweit eine wörtliche Übersetzung der gefundenen Kategoriebegriffe zielführend ist, oder ob die Auswahl der Begriffe und deren Positionierung auf der Intervallskala für andere Sprachräume neu gestaltet werden muss, das wäre zu untersuchen.



---

## Literaturverzeichnis

- [1] M.R. LUO: The quality of light sources. In: *Color Technol* 127 (2011), S. 75-87.
- [2] Commission Internationale DE L'ÉCLAIRAGE, Method of Measuring and Specifying Color Rendering Properties of Light Sources, Publication CIE 13.3-1995, 1995.
- [3] J. SCHANDA: A combined colour preference - colour rendering index. In: *Lighting Research and Technology* 17 (1985), S. 31-34.
- [4] L.C. OU, M.R. LUO, A. WOODCOCK, A. WRIGHT: A study of colour emotion and colour preference. Part III: Colour preference Modeling. In: *Color Res Appl* 29 (2004), S. 381-389.
- [5] L.C. OU, M.R. LUO: A colour harmony model for two-colour combinations. In: *Color Res Appl* 31 (2006), S. 191-204.
- [6] F. SZABO, P. BODROGI, J. SCHANDA: Experimental Modeling of Colour Harmony. In: *Color Res Appl* 35 (2010), S. 34-49.
- [7] W.A. THORNTON: Color discrimination index. In: *J Opt Soc Am* 62 (1972), S. 191-194.
- [8] S.A. FOTIOS: *The perception of light sources of different colour properties*. UMIST UK, 1997
- [9] H. XU: Color-Rendering Capacity of Light. In: *Color Res Appl* 18 (1993), S. 267-269.
- [10] S. BRÜCKNER, V. TRINH QUANG, T.Q. KHANH, Double-binned LEDs reduce inhomogeneity in rearlamps?, in: T.Q. Khanh (Ed.), 9th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011, Utz, Herbert, Darmstadt, 2011, pp. 154-163 (1088).
- [11] H.S. FAIRMAN, M.H. BRILL, H. HEMMENDINGER: How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data. In: *Color Research & Application* 22 (1997), S. 11-23.
- [12] G. WYSZECKI, W.S. STILES: *Color science*. Wiley New York, 1982. - ISBN 0471021067
- [13] R.G. KUEHNI: Towards an improved uniform color space. In: *Color Res Appl* 24 (1999), S. 253-265.
- [14] H. WANG, G. CUI, M.R. LUO, H. XU: Evaluation of colour-difference formulae for different colour-difference magnitudes. In: *Color Research & Application* (2011), S. n/a-n/a.
- [15] S.Y. ZHU, M.R. LUO, G.H. CUI, C.J. LI, B. RIGG: Comparing Large Colour-Difference Data Sets. In: *Color Res Appl* 36 (2011), S. 111-117.
- [16] R.G. KUEHNI: Analysis of five sets of color difference data. In: *Color Research & Application* 26 (2001), S. 141-150.
- [17] G. WYSZECKI, H. WRIGHT: Field Trial of the 1964 CIE Color-Difference Formula. In: *J Opt Soc Am* 55 (1965), S. 1166-1174.
- [18] G. WYSZECKI: Uniform Color Scales - Cie 1964 U-Star V-Star W-Star Conversion of Osa Committee Selection. In: *J Opt Soc Am* 65 (1975), S. 456-460.
- [19] D.L. MACADAM: Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight. In: *J. Opt. Soc. Am.* 32 (1942), S. 247-273.
- [20] C.I.D. L'ÉCLAIRAGE, Method of Measuring and Specifying Color Rendering Properties of Light Sources, Publication CIE 13.3, 1965.

- 
- [21] K. MCLAREN: Development of Cie 1976 (Lab) Uniform Color Space and Color-Difference Formula. In: *J Soc Dyers Colour* 92 (1976), S. 338-341.
- [22] S.M. NEWHALL, D. NICKERSON, D.B. JUDD: Final Report of the O.S.A. Subcommittee on the Spacing of the Munsell Colors. In: *J. Opt. Soc. Am.* 33 (1943), S. 385-411.
- [23] M.R. LUO, G. CUI, B. RIGG: The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. In: *Color Res Appl* 26 (2001), S. 340-350.
- [24] DIN, DIN 6176. Farbmtrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der DIN99-Formel, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, Germany, 1999.
- [25] F.J.J. CLARKE, R. McDONALD, B. RIGG: Modification to the JPC79 Colour-difference Formula. In: *J Soc Dyers Colour* 100 (1984), S. 128-132.
- [26] R. McDONALD, K.J. SMITH: CIE94-a new colour-difference formula\*. In: *J Soc Dyers Colour* 111 (1995), S. 376-379.
- [27] M.R. LUO, G.H. CUI, C.J. LI: Uniform colour spaces based on CIECAMO2 colour appearance model. In: *Color Res Appl* 31 (2006), S. 320-330.
- [28] N. MORONEY, M.D. FAIRCHILD, R.W. HUNT, C. LI, M.R. LUO, T. NEWMAN, The CIECAM02 color appearance model, Color and Imaging Conference, Society for Imaging Science and Technology, 2002, pp. 23-27.
- [29] W.R.J. BROWN, D.L. MACADAM: Visual Sensitivities to Combined Chromaticity and Luminance Differences. In: *J Opt Soc Am* 39 (1949), S. 808-&.
- [30] W.R.J. BROWN: Color Discrimination of Twelve Observers. In: *J. Opt. Soc. Am.* 47 (1957), S. 137-143.
- [31] G. WYSZECKI, G.H. FIELDER: New color-matching ellipses. In: *J Opt Soc Am* 61 (1971), S. 1135-1152.
- [32] G. WYSZECKI: Color matching and color-difference matching. In: *J Opt Soc Am* 62 (1972), S. 117-128.
- [33] D.L. MACADAM: Uniform Color Scales. In: *J Opt Soc Am* 64 (1974), S. 1691-1702.
- [34] K. RICHTER: *Farbempfindungsmerkmal Elementarbunton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In-und Umfeld*. Wirtschaftsverl. NW, Verlag für neue Wissenschaft, 1985. - ISBN 3883144207
- [35] M.R. LUO, B. RIGG: Chromaticity-Discrimination Ellipses for Surface Colors. In: *Color Res Appl* 11 (1986), S. 25-42.
- [36] S. ADDAE-BADU: *Large colour differences between surface colours*. University of Bradford, 1986
- [37] R.S. BERNIS, D.H. ALMAN, L. RENIFF, G.D. SNYDER, M.R. BALONON-ROSEN: Visual determination of suprathreshold color-difference tolerances using probit analysis. In: *Color Research & Application* 16 (1991), S. 297-316.
- [38] D.H. KIM, J.H. NOBBS, New weighting functions for the weighted CIELAB colour difference formula, in: C.S.A.o. Japan (Ed.), AIC Color 97, Association Internationale de la Couleur (AIC), Kyoto, 1997, pp. 446-449.
- [39] D.H. KIM: *The influence of parametric effects on the appearance of small colour differences*. University of Leeds, 1997
-

- 
- [40] M.R. POINTER, G.G. ATTRIDGE: Some aspects of the visual scaling of large colour differences. In: *Color Research & Application* 22 (1997), S. 298-307.
- [41] K. WITT: Geometric relations between scales of small colour differences. In: *Color Research & Application* 24 (1999), S. 78-92.
- [42] S.S. GUAN, M.R. LUO: A colour-difference formula for assessing large colour differences. In: *Color Res Appl* 24 (1999), S. 344-355.
- [43] S. ZHU, M.R. LUO, G. CUI, New experimental data for investigating uniform color spaces, 9th Congress of the International Color Association (AIC Color 2001), International Society for Optics and Photonics, Rochester, 2001, pp. 626-629.
- [44] P. KITTELMANN: *Visuelle Beurteilung von kleinen und großen Farbunterschieden und Beschreibung mit Farbabstandsformeln*. TU Berlin, Dissertation. 2010
- [45] W.R.T. BROWN, D.L. MACADAM: Visual Sensitivities to Combined Chromaticity and Luminance Differences. In: *J. Opt. Soc. Am.* 39 (1949), S. 808-823.
- [46] R.G. KUEHNI: Threshold color differences compared to supra-threshold color differences. In: *Color Res Appl* 25 (2000), S. 226-229.
- [47] M.R. LUO, B. RIGG: Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours. In: *Color Research & Application* 11 (1986), S. 25-42.
- [48] H.S. XU, H. YAGUCHI, S. SHIOIRI: Correlation between visual and colorimetric scales ranging from threshold to large color difference. In: *Color Res Appl* 27 (2002), S. 349-359.
- [49] G. WYSZECKI, G.H. FIELDER: Color-difference matches. In: *J Opt Soc Am* 61 (1971), S. 1501-1513.
- [50] R.L. ALFVIN, M.D. FAIRCHILD: Observer variability in metameric color matches using color reproduction media. In: *Color Research & Application* 22 (1997), S. 174-188.
- [51] B. OICHERMAN, M.R. LUO, B. RIGG, A.R. ROBERTSON: Effect of observer metamerism on colour matching of display and surface colours. In: *Color Res Appl* 33 (2008), S. 346-359.
- [52] P. URBAN, M. FEDUTINA, I. LISSNER: Analyzing small suprathreshold differences of LCD-generated colors. In: *J Opt Soc Am A* 28 (2011), S. 1500-1512.
- [53] A. FROHNAPFEL, S. BRÜCKNER, P. BODROGI, T. KHANH: Untersuchungen zur Farbwahrnehmung. In: *FKT: Die Fachzeitschrift für Fernsehen Film und Elektronische Medien* 63 (2009), S. 19-24.
- [54] W.S. STILES, J.M. BURCH: N.P.L. Colour-matching Investigation: Final Report (1958). In: *Optica Acta: International Journal of Optics* 6 (1959), S. 1-26.
- [55] W. DAVIS, Y. OHNO: Color quality scale. In: *Opt Eng* 49 (2010), S. -.
- [56] D. ALLEYSSON, J. HERAULT: Variability in color discrimination data explained by a generic model with nonlinear and adaptive processing. In: *Color Res Appl* 26 (2001), S. S225-S229.
- [57] J.M. EZQUERRO, F. CARREÑO, J.M. ZOIDO: Interobserver variability and color representation systems. In: *Color Research & Application* 28 (2003), S. 15-24.
- [58] P. CSUTI, J. SCHANDA: Colour matching experiments with RGB-LEDs. In: *Color Res Appl* 33 (2008), S. 108-112.
- [59] G. HARBERS, K. MCGRODDY, R. PETLURI, P.K. TSENG, J. YRIBERRI, Visual color matching of LED and tungsten halogen light sources, CIE 2010 - Lighting Quality & Energy Efficiency, Vienna, Austria, 2010, pp. 259-261.
-

- 
- [60] K. BIESKE, A. KALTENBACH: Untersuchungen zur Wahrnehmung von Farbunterschieden. In: *Lux junior* 23 (2005).
- [61] K. BIESKE: *Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme*. Der Andere Verlag, 2010. - ISBN 3899599993
- [62] T.Q. KHANH, P. BODROGI, T.Q. VINH, S. BRÜCKNER: *Farbwiedergabe von konventionellen und Halbleiter-Lichtquellen*. Pflaum Verlag: München, 2013. - ISBN 978-3-7905-1032-4
- [63] C.Y. FU, C.J. LI, G.H. CUI, M.R. LUO, R.G. HUNT, M.R. POINTER: An investigation of colour appearance for unrelated colours under photopic and mesopic vision. In: *Color Res Appl* 37 (2012), S. 238-254.
- [64] N. SÁNDOR, J. SCHANDA, Visual Colour-rendering experiments, AIC Colour, 2005, pp. 511-514.
- [65] N. SANDOR, J. SCHANDA: Visual colour rendering based on colour difference evaluations. In: *Lighting Res Technol* 38 (2006), S. 225-239.
- [66] C. LI, M.R. LUO, C.J. LI, G.H. CUI: The CRI-CAM02UCS Colour Rendering Index. In: *Color Res Appl* 37 (2012), S. 160-167.
- [67] K.A.G. SMET, J. SCHANDA, L. WHITEHEAD, R.M. LUO: CRI2012: A proposal for updating the CIE colour rendering index. In: *Lighting Research and Technology* (2013).
- [68] J. SCHANDA, N. SANDOR, Colour rendering, past—present—future, Proc. Int. Lighting and Colour Conf, Capetown, 2003, pp. 76-85.
- [69] A. FROHNAPFEL: *Psychologische und physiologische Aspekte von Farbwiedergabe und deren Anwendung in der LED-Technologie*. TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Diplomarbeit. 2008
- [70] C.I.D. L'ÉCLAIRAGE, CIE Compte Rendue de 11 Session, Paris, Paris, 1948.
- [71] B.T. BARNES: Band Systems for Appraisal of Color Rendition. In: *J. Opt. Soc. Am.* 47 (1957), S. 1124-1129.
- [72] B.H. CRAWFORD: Measurement of Color Rendering Tolerances. In: *J. Opt. Soc. Am.* 49 (1959), S. 1147-1147.
- [73] J.L. OUWELTJES: The specification of colour rendering properties of fluorescent lamps. In: *Farbe* 9,4/6 (1960), S. 207-246.
- [74] W. MÜNCH, U. SCHULTZ: Bestimmung der Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen nach einem vereinfachten Testfarbenverfahren. In: *Lichttechnik* 15/5 (1963), S. 269-274.
- [75] D. NICKERSON: Recent work on color rendering in the United States. In: *Farbe* 12,1/6 (1963), S. 69-74.
- [76] H. LANG, in: H. Lang (Ed.), *Farbwiedergabe in den Medien*, Muster Schmidt Verlag, Göttingen, 1995, pp. 187-188.
- [77] C.I.D. L'ÉCLAIRAGE, Colour rendering, closing remarks, Publication CIE 135.2, CIE, 1999.
- [78] D.B. JUDD: A flattery index for Artificial Illuminants. In: *Illuminating Engineering (America)* 62 (1967), S. 593-598.
- [79] W.A. THORNTON: A validation of the color preference index. In: *J Illum Eng Soc* 4 (1974), S. 48-52.
- [80] H. XU: Color-rendering capacity of illumination. In: *J Opt Soc Am* 73 (1983), S. 1709-1713.
-

- 
- [81] M.R. POINTER: Measuring colour rendering—A new approach. In: *Lighting Research and Technology* 18 (1986), S. 175-184.
- [82] J.A. WORTHEY: Color rendering: Asking the question. In: *Color Res Appl* 28 (2003), S. 403-412.
- [83] F. SZABO, P. BODROGI, J. SCHANDA: A colour harmony rendering index based on predictions of colour harmony impression. In: *Lighting Res Technol* 41 (2009), S. 165-182.
- [84] Y. OHNO, W. DAVIS, Toward an improved color rendering metric, in: Y. Ohno, W. Davis (Eds.), SPIE, SPIE, 2005.
- [85] C.I.D. L'ÉCLAIRAGE, International Lighting Vocabulary (a joint CIE/IEC Publication), Publication CIE 17.4-1987, 1987.
- [86] G.B. BUCK, H.C. FROELICH: color characteristics of human complexions. In: *Illuminating Engineering (America)* 63 (1948), S. 27-49.
- [87] C.L. SANDERS: Assessment of color rendition under an illuminant using color tolerance for natural objects. In: *Illuminating Engineering (America)* 54 (1959), S. 640-646.
- [88] M.D. FAIRCHILD, in: M.D. Fairchild (Ed.), *Color Appearance Models*, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, 2005, pp. 208-224.
- [89] M.R. POINTER, Measuring color rendering - A new approach II, DQL-Report, 2007.
- [90] J.A. WORTHEY: Color rendering: a calculation that estimates colorimetric shifts. In: *Color Res Appl* 29 (2004), S. 43-56.
- [91] F. SZABO, I. ZILIZI, P. BODROGI, J. SCHANDA, Visual experiments on colour harmony: a formula and a rendering index, CIE 26th Session, CIE, Beijing, 2007, pp. D1-2.
- [92] P. BODROGI, P. CSUTI, P. HORVATH, J. SCHANDA, Why does the CIE Colour Rendering Index fail for white RGB LED light sources?, CIE Symposium 2004 on LED Light Sources, Tokyo, 2004.
- [93] X. GUO, K. HOUSER: A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources. In: *Lighting Research and Technology* 36 (2004), S. 183-197.
- [94] K. JUNGNITSCH: *Subjektive Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichem Spektrum*. TU Ilmenau, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, 2005
- [95] C. LI, M.R. LUO, G.H. CUI, C.J. LI: Evaluation of the CIE colour rendering index. In: *Color Technol* 127 (2011), S. 129-135.
- [96] J. SCHANDA: The Effect of Chromatic Adaptation on Color Rendering. In: *Color Res Appl* 6 (1981), S. 221-227.
- [97] J. SCHANDA, The concept of colour rendering revisited, Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, Society for Imaging Science and Technology, 2002, pp. 37-41.
- [98] J.J. OPSTELTEN: The dependence of the general colour rendering index on the set of test colours, the standard observer and the colour-difference formula. In: *Lighting Research and Technology* 12 (1980), S. 186-194.
- [99] A. BORBELY, A. SAMSON, J. SCHANDA: The concept of correlated colour temperature revisited. In: *Color Res Appl* 26 (2001), S. 450-457.
- [100] N. SÁNDOR, P. CSUTI, P. BODROGI, J. SCHANDA, Visual observation of colour rendering, CIE LED Conference, 2004.
-



- 
- 
- [101] P. BODROGI, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH, Re-defining the colour rendering index, CIE Light and Lighting Conference, Budapest, 2009.
- [102] P. BODROGI, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH: Ordinal Scale Based Description of Colour Rendering. In: *Color Res Appl* 36 (2011), S. 272-285.
- [103] S. BRÜCKNER, P. BODROGI, T.Q. KHANH, Colour rendering of new white LED light sources – visual tests, LuxEuropa 2009, Istanbul, 2009.
- [104] N. SÁNDOR, J. SCHANDA: Direct visual assessment of colour rendering. In: *PUBLICATIONS-COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE CIE 152* (2003), S. D1-42.
- [105] A. NEUMANN, J.J. WIERER, W. DAVIS, Y. OHNO, S.R.J. BRUECK, J.Y. TSAO: Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality. In: *Opt Express* 19 (2011), S. A982-A990.
- [106] J. SCHANDA, N. SANDOR, Color Rendering, Past Present Future, International Lighting and Colour Conference, Cape Town, South Africa, 2003, pp. 76-85.
- [107] C. VAN TRIGT: Color rendering, a reassessment. In: *Color Res Appl* 24 (1999), S. 197-206.
- [108] C.I.D. L'ÉCLAIRAGE, Colour Rendering of White LED Light Sources, Technical Report CIE 177:2007, 2007.
- [109] K. HASHIMOTO, T. YANO, M. SHIMIZU, Y. NAYATANI: New method for specifying color-rendering properties of light sources based on feeling of contrast. In: *Color Res Appl* 32 (2007), S. 361-371.
- [110] W. DAVIS, Y. OHNO: Approaches to color rendering measurement. In: *J Mod Optic* 56 (2009), S. 1412-1419.
- [111] Y.-F. CHOU, M.R. LUO, J. SCHANDA, P. CSUTI, F. SZABO, G. SARVARI, Recent Developments in Colour Rendering Indices and Their Impacts in Viewing Graphic Printed Materials, Nineteenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications, San Jose, California, 2011.
- [112] L.A. WHITEHEAD, M.A. MOSSMAN: A Monte Carlo method for assessing color rendering quality with possible application to color rendering standards. In: *Color Research & Application* 37 (2012), S. 13-22.
- [113] K. SMET, L. WHITEHEAD: Meta-Standards for Color Rendering Metrics and Implications for Sample Spectral Sets. In: *Color and Imaging Conference 2011* (2011), S. 76-81.
- [114] P. BODROGI, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH, The newest research results for a re-defintion of the color rendering index of today light sources, DfWG-Tagung, Berlin, 2009.
- [115] T.Q. KHANH, P. BODROGI, S. BRÜCKNER, Farbwiedergabeindex - Untersuchungsmethoden und jüngste internationale Forschungsergebnisse zur Redefinition, Licht 2010, Pflaum Verlag GmbH & Co.KG, Wien, 2010.
- [116] T.Q. KHANH, P. BODROGI, S. BRÜCKNER, Rank-order based description of colour rendering: definition, observer variability and validation, CIE 2010 "Lighting Quality & Energy Efficiency", Wien, 2010.
- [117] P. BODROGI, N. KRAUSE, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH, H. WINKLER, Psychological relationship between colour difference scales and colour rendering scales, AIC Interaction of Colour & Light in the Arts and Sciences, Zürich, 2011.
- [118] P. BODROGI, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH, Farbwiedergabe für moderne Lichtquellen, 2011.
-

- 
- 
- [119] N. KRAUSE, P. BODROGI, T.Q. KHANH: Bewertung der Farbwiedergabe - Reflexionsspektren von Objekten unter verschiedenen weissen Lichtquellen. In: *Licht* 5/2012 (2012).
- [120] N. KRAUSE, S. BRÜCKNER, P. BODROGI, Neue 3-Kammer-Methode für die Psychometrie der Farbqualität für weiße LEDs, in: H. v.Weltzien, S. Völker, R. Voigt (Eds.), *Licht* 2012, Berlin, 2012, pp. 469-475.
- [121] P. BODROGI, N. KRAUSE, S. BRÜCKNER, T. KHANH, H. WINKLER, The Psychometry of Colour Quality: a Three-Chamber Viewing Booth Method, 3th International Conference on Appearance, Edinburgh, 2012, pp. 17-19.
- [122] P. BODROGI, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH, Bewertung der Farbdifferenzen im CIECAM02-Farbenraum und auf Ordinalskalen, Expertenseminar Farbdifferenzen, Darmstadt, 2012.
- [123] P. BODROGI, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH, Farbwiedergabe für moderne Lichtquellen, LiTG-Schrift, 2012.
- [124] P. BODROGI, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH, H. WINKLER: Visual assessment of light source color quality. In: *Color Research & Application* 38 (2013), S. 4-13.
- [125] P. BODROGI, S. BRÜCKNER, N. KRAUSE, T.Q. KHANH: Semantic interpretation of color differences and color-rendering indices. In: *Color Research & Application* Early View (2013).
- [126] P. BODROGI, N. KRAUSE, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH: Semantic Interpretation of Colour Rendering Indices: A Comparison of CRI and CRI2012. In: *Light Eng* 21 (2013), S. 26-31.
- [127] ANSI/NEMA, ANSI\_NEM\_ANSLG C78.377: Specifications for the chromaticity of solid state lighting products. , NEMA, 2008.
- [128] NEMA, NEMA SSL 3, High-Power White LED Binning for General Illumination, National Electrical Manufacturers Association, 2011.
- [129] U. SCHLÖDER, M. RODE, ABCS: Automotive Binning Colour Standard, 8th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009, Utz, Darmstadt, Germany, 2009, pp. 215-221.
- [130] S. BRÜCKNER, Q.T. VINH, Binning von Hochleistungs-LEDs - Grundlagen, Defizite und Lösungen, VDI-Tagung "Innovative Beleuchtung mit LED", VDI, Düsseldorf, 2011.
- [131] A. GROH: *Temperaturabhängigkeit licht- und farbertechnischer Größen von LED-Bauelementen jüngerster Generation*. TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Studienarbeit. 2007
- [132] C. SINGER: *Lichtstrommessung an LED-Bauelementen*. TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Studienarbeit. 2007
- [133] Q.V. TRINH, S. BRÜCKNER, T.Q. KHANH: LED-Verhalten bei Strom- und Temperaturveränderungen. In: *Licht* (2011), S. 70-76.
- [134] O. NOTTRODT: *Ermittlung der Sperrschichttemperatur von Hochleistungs-LEDs durch Messung der Vorwärtsspannung*. TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Studienarbeit. 2008
- [135] O. NOTTRODT: *Entwicklung eines Messsystems zur Bestimmung des thermischen Widerstandes und farbmtrischer Eigenschaften von Hochleistungs-LEDs im Pulsbetrieb*. TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Diplomarbeit. 2009
- [136] S. BRÜCKNER, T.Q. VINH, T.Q. KHANH, Double-binned LEDs reduce inhomogeneity in rearlamps?, 9th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2011, pp. 154-163.

- 
- 
- [137] H. XU, H. YAGUCHI, S. SHIOIRI: Correlation between visual and colorimetric scales ranging from threshold to large color difference. In: *Color Research & Application* 27 (2002), S. 349-359.
- [138] S.S. GUAN, M.R. LUO: Investigation of parametric effects using small colour differences. In: *Color Res Appl* 24 (1999), S. 331-343.
- [139] S.S. GUAN, M.R. LUO: Investigation of parametric effects using large colour differences. In: *Color Res Appl* 24 (1999), S. 356-368.
- [140] A. LINKSZ: Farnsworth Panel D-15 Test. In: *Am J Ophthalmol* 62 (1966), S. 27-&.
- [141] P. LANTHONY: Desaturated Panel D-15. In: *Documenta Ophthalmologica* 46 (1978), S. 185-189.
- [142] C.J. LI, M.R. LUO: Testing the robustness of CIECAM02. In: *Color Res Appl* 30 (2005), S. 99-106.
- [143] D.L. MACADAM: Colorimetric data for samples of OSA uniform color scales. In: *J. Opt. Soc. Am.* 68 (1978), S. 121-130.
- [144] M.R. LUO, B. RIGG: Bfd (1-C) Color-Difference Formula .1. Development of the Formula. In: *J Soc Dyers Colour* 103 (1987), S. 86-94.
- [145] G. CUI, M.R. LUO, B. RIGG, G. ROESLER, K. WITT: Uniform colour spaces based on the DIN99 colour-difference formula. In: *Color Res Appl* 27 (2002), S. 282-290.
- [146] R.G. KUEHNI: From color-matching error to large color differences. In: *Color Res Appl* 26 (2001), S. 384-393.
- [147] R.G. KUEHNI: Analysis of five sets of color difference data. In: *Color Res Appl* 26 (2001), S. 141-150.
- [148] S. GEOL LEE, R. SHAMEY, D. HINKS, W. JASPER: Development of a comprehensive visual dataset based on a CIE blue color center: Assessment of color difference formulae using various statistical methods. In: *Color Research & Application* 36 (2011), S. 27-41.
- [149] R. SHAMEY, L.M. CÁRDENAS, D. HINKS, R. WOODARD: Comparison of naïve and expert subjects in the assessment of small color differences. In: *J. Opt. Soc. Am. A* 27 (2010), S. 1482-1489.
- [150] R. SHAMEY, M.G. SEDITO, R.G. KUEHNI: Comparison of Unique Hue Stimuli Determined by Two Different Methods Using Munsell Color Chips. In: *Color Res Appl* 35 (2010), S. 419-424.
- [151] H.S. XU, H. YAGUCHI: Visual evaluation at scale of threshold to suprathreshold color difference. In: *Color Res Appl* 30 (2005), S. 198-208.
- [152] R. KUEHNI, D. HINKS, R. SHAMEY: Experimental Object Color Unique Hue Data for the Mean Observer for Color Appearance Modeling. In: *Color Res Appl* 33 (2008), S. 505-506.
- [153] M. HUANG, H. LIU, G. CUI, M.R. LUO: Testing uniform colour spaces and colour-difference formulae using printed samples. In: *Color Research & Application* (2011), S. n/a-n/a.
- [154] R.G. KUEHNI, R. RAMANATH: Comparing observers. In: *Color Res Appl* 29 (2004), S. 183-186.
- [155] Y. QIAO, R.S. BERNS, L. RENIFF, E. MONTAG: Visual determination of hue suprathreshold color-difference tolerances. In: *Color Research & Application* 23 (1998), S. 302-313.
- [156] K.M. BRAUN, M.D. FAIRCHILD: Testing five color-appearance models for changes in viewing conditions. In: *Color Research & Application* 22 (1997), S. 165-173.
- [157] A. KRAUSHAAR, Die Anwendung moderner Farbabstandsformeln in der grafischen Industrie, Expertenseminar Farbdifferenzen, Darmstadt, 2012.
-



- 
- [158] B. OICHERMAN, M.R. LUO, B. RIGG, A.R. ROBERTSON: Adaptation and Colour Matching of Display and Surface Colours. In: *Color Res Appl* 34 (2009), S. 182-193.
- [159] J.J. VOS: Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer. In: *Color Research & Application* 3 (1978), S. 125-128.
- [160] S. SÖLLNER: *Untersuchungen zur optimalen spektralen Strahlungsverteilung für die Erzielung einer hohen Farbwiedergabegüte mit LEDs*. Zugl.: Ilmenau, Techn. Univ., Diplomarbeit, 2009, 2009
- [161] S.A. FOTIOS, C. CHEAL: A comparison of simultaneous and sequential brightness judgements. In: *Lighting Res Technol* 42 (2010), S. 183-197.

---

## Eigene Veröffentlichungen und betreute Arbeiten

---

---

### Bücher

---

- Khanh, T. Q., P. Bodrogi, T. Q. Vinh, S. Brückner: Farbwiedergabe von konventionellen und Halbleiter-Lichtquellen. Pflaum Verlag: München, 2013. - ISBN 978-3-7905-1032-4
- Khanh, T. Q., S. Brückner: Bead string artefact of PWM LED rearlights with different frequencies, Chapter 6.7 in: T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, H. Winkler (Eds.), LED Lighting Technology and Perception. Wiley-VCH, to be published in 2014.

---

### Artikel in Fachzeitschriften

---

- Singer, C., S. Brückner, et al. (2007). Messung von Lichtstrom und Lichtausbeute an modernen Hochleistungsleuchtdioden. LICHT 9/2007 59: 714-718.
- Frohnappfel, A., S. Brückner, et al. (2009). Untersuchungen zur Farbwahrnehmung. FKT: Die Fachzeitschrift für Fernsehen Film und Elektronische Medien 63(1-2): 19-24.
- Khanh, T. Q., C. Schiller, et al. (2010). Lichttechnische und technologische Aspekte der LED-Straßenbeleuchtung. LICHT (7-8): 536-542.
- Brückner, S., T. Q. Khanh (2011). Dimmung von Hochleistungs-LEDs. LICHT 2011(3): 44-49.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2011). Ordinal Scale Based Description of Colour Rendering. Color Research and Application 36(4): 272-285.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2011). Visual assessment of light source color quality. Color Research and Application 38(1): 4-13.
- Trinh, Q. V., S. Brückner, et al. (2011). LED-Verhalten bei Strom- und Temperaturveränderungen. LICHT (6): 70-76.
- Brückner, S., T. Q. Khanh (2012). Dimmung von Hochleistung-LED. ET Licht(4): 20-24.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2012). Farbwiedergabe für moderne Lichtquellen. LiTG-Schrift.
- Trinh, Q. V., S. Brückner, et al. (2012). Binning-Strategie bei LED. ET Licht(3): 10-15.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2013). Semantic interpretation of color differences and color-rendering indices. Color Research & Application: Early View.
- Bodrogi, P., N. Krause, et al. (2013). Semantic Interpretation of Colour Rendering Indices: A Comparison of CRI and CRI2012. Light & Engineering 21(4): 26-31.

---

## Konferenzbeiträge

---

- Brückner, S., T. Q. Khanh (2007). A field experiment on the perception of automotive rear lights using pulsed LEDs with different frequencies. Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting. Darmstadt, Utz.
- Groh, A., S. Brückner, et al. (2007). The temperature-dependent changes of the photometrical and colorimetrical parameters of today high power LEDs. Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, Utz.
- Groh, A., S. Brückner, et al. (2007). The temperature-dependent changes of the photometrical and colorimetrical parameters of today high power LEDs. LuxJunior 2007. Dörfeld/Ilm.
- Singer, C., S. Brückner, et al. (2007). Methods and techniques for the absolute and accurate determination of the luminous efficiency of today highpower Leds. Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting. Darmstadt, Utz.
- Singer, C., S. Brückner, et al. (2007). Methods and techniques for absolute and accurate determination of luminous efficiency of today high power LEDs. LuxJunior 2007. Dörfeld/Ilm.
- Brückner, S., C. Singer, et al. (2008). Lichttechnisches und farbmétrisches Verhalten von Hochleistungs-LEDs im Pulsbetrieb bis 45 kHz. Licht 2008. Ilmenau.
- Khanh, T. Q., P. Bodrogi, et al. (2008). Über die interpersonellen Unterschiede bei der Farbwahrnehmung an Hand der Datenanalyse der Stiles-Burch-Ergebnisse 1955-1959. DfwG-Konferenz 2008.
- Sprute, J. H., T. Q. Khanh, et al. (2008). Bewertung der Blendbelastung neuartiger Kfz-Scheinwerfersysteme. Licht 2008. Ilmenau.
- Brückner, S., P. Bodrogi, et al. (2009). Colour rendering of new white LED light sources – visual tests. LuxEuropa 2009. Istanbul.
- Brückner, S., P. Bodrogi, et al. (2009). Inter-observer variability of colour vision and its effect on the colour quality of modern light sources. LuxJunior 2009. Dörfeld/Ilm.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2009). Re-defining the colour rendering index. CIE Light and Lighting Conference. Budapest.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2009). Effect of inter-observer variability of colour vision on the colour quality of modern light sources. LuxEuropa 2009. Istanbul.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2009). The newest research results for a re-defintion of the color rendering index of today light sources. DfWG-Tagung. Berlin.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2009). Research report and proposal for a new assessment procedure. Written for CIE TC 1-69: Color rendition by white light sources.

- 
- Brückner, S., P. Bodrogi, et al. (2010). Was bestimmt die Lichtqualität in der Innenbeleuchtung? Ergebnisse einer Reihe wahrnehmungspsychologischer Feldtests. Licht 2010. Wien.
- Brückner, S., T. Q. Khanh (2010). Was bestimmt die Lichtqualität in der Innenraumbeleuchtung? - Ergebnisse visueller Versuche. DfwG-Jahrestagung 2010. Darmstadt.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2010). Dimensions of light source colour quality. Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision 2010(1): 155-159.
- Khanh, T. Q., P. Bodrogi, et al. (2010). Farbwiedergabeindex - Untersuchungsmethoden und jüngste internationale Forschungsergebnisse zur Redefinition. Licht 2010. Wien.
- Khanh, T. Q., P. Bodrogi, et al. (2010). Rank-order based description of colour rendering: definition, observer variability and validation. CIE Conference on Lighting Quality & Energy Efficiency. Wien.
- Brückner, S., T. Q. Vinh, et al. (2011). Double-binned LEDs reduce inhomogeneity in rearlamps? Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting. Darmstadt, Utz.
- Brückner, S. (2011). Thermisches Verhalten und Alterung von Hochleistungs-LEDs. Lebensdauer von LED-Beleuchtungssystemen. EMPA-Akademie, Dübendorf, Schweiz.
- Brückner, S. (2011). Eigenschaften moderner Hochleistungs-LEDs. Licht: von der Forschung zur Anwendung. München, LiTG.
- Brückner, S., T. Q. Vinh (2011). Binning von Hochleistungs-LEDs - Grundlagen, Defizite und Lösungen. Innovative Beleuchtung mit LED. Düsseldorf, VDI.
- Bodrogi, P., N. Krause, et al. (2011). Psychological relationship between colour difference scales and colour rendering scales. AIC Interaction of Colour & Light in the Arts and Sciences. Zürich.
- Brückner, S. (2012). Der Farbraum CIECAM02-UCS. Expertenseminar Farbdifferenzen. Darmstadt.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2012). Bewertung der Farbdifferenzen im CIECAM02-Farbenraum und auf Ordinalskalen. Expertenseminar Farbdifferenzen. Darmstadt.
- Bodrogi, P., S. Brückner, et al. (2012). Kenngrößen der Farbqualität in der Innenraumbeleuchtung. Licht 2012. Berlin.
- Bodrogi, P., N. Krause, et al. (2012). The Psychometry of Colour Quality: a Three-Chamber Viewing Booth Method. 3th International Conference on Appearance: 17-19. Edinburgh.
- Krause, N., S. Brückner, et al. (2012). Neue 3-Kammer-Methode für die Psychometrie der Farbqualität für weiße LEDs. Licht 2012. Berlin.

---

## Betreute studentische Arbeiten

---

- Groh, Andreas: „Temperaturabhängigkeit licht- und farbtechnischer Größen von LED-Bauelementen“. Studienarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2007
- Singer, Carsten: „Lichtstrommessung an LED-Bauelementen“. Studienarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2007
- Kutschenko, Wjatcheslaw: „Entwicklung eines Mixed-Signal-Lasertreibers für ein Laserprojektionsmodul“. Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2008
- Singer, Carsten: „Entwicklung einer Beleuchtungseinheit für einen Filmscanner“. Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2008
- Nottrodt, Oliver: „Ermittlung der Sperrschichttemperatur von Hochleistungs-LEDs durch Messung der Vorwärtsspannung“. Studienarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2008
- Erbes, Sebastian: „Weißes Hochleistungs-LED-Modul“. Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2008
- Frohnappel, Anja: „Psychologische und physiologische Aspekte von Farbwiedergabe und deren Anwendung in der LED-Technologie“. Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2008
- Nottrodt, Oliver: „Entwicklung eines Messsystems zur Bestimmung des thermischen Widerstandes und farbmatischer Eigenschaften von Hochleistungs-LEDs im Pulsbetrieb“. Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2009
- Ihringer, Janick: „Modellierung moderner Hochleistungs-Leuchtdioden im Pulsbetrieb“. Masterarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2010
- Schaller, Sebastian: „Konzeption und Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung des Alterungsverhaltens von Hochleistungsleuchtdioden“. Masterarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2011

# Anhang A Detailergebnisse der Versuche

## Zweikammer-Box

### Farbtemperatur (CCT)

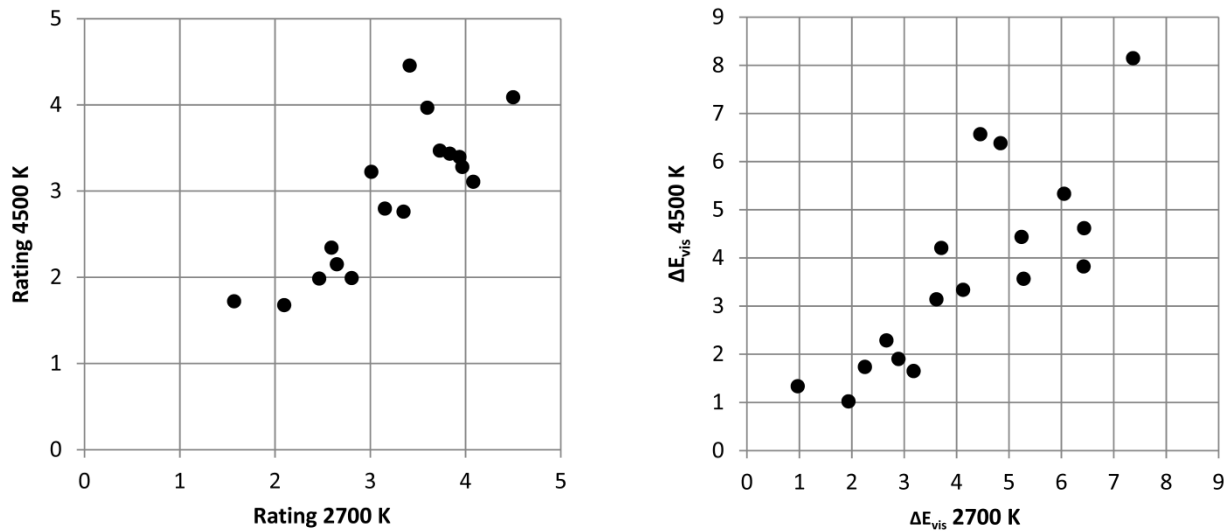


Abbildung A.1: Vergleich der visuellen Bewertungen *Rating* (links;  $R^2=0,74$ ;  $p<0,001$ ) und  $\Delta E_{vis}$  (rechts;  $R^2=0,76$ ;  $p<0,001$ ) beider CCTs; Zuordnung in der  $u'v'$ -Farbtafel

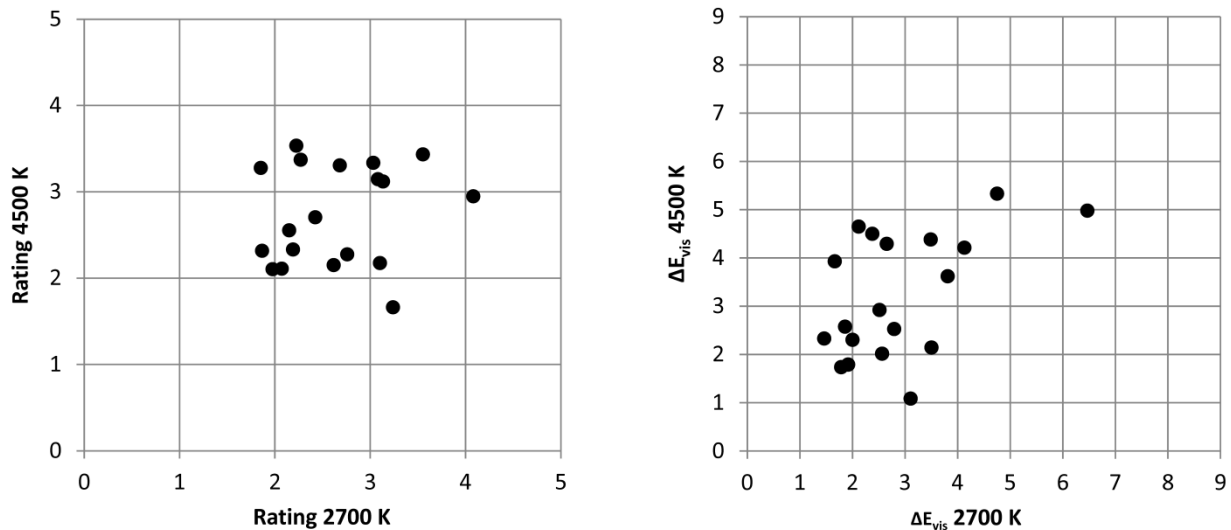


Abbildung A.2: Vergleich der visuellen Bewertungen *Rating* (links;  $R^2=0,02$ ;  $p=0,52$ ) und  $\Delta E_{vis}$  (rechts;  $R^2=0,27$ ;  $p=0,034$ ) beider CCTs; Zuordnung im CIELAB-Farbraum

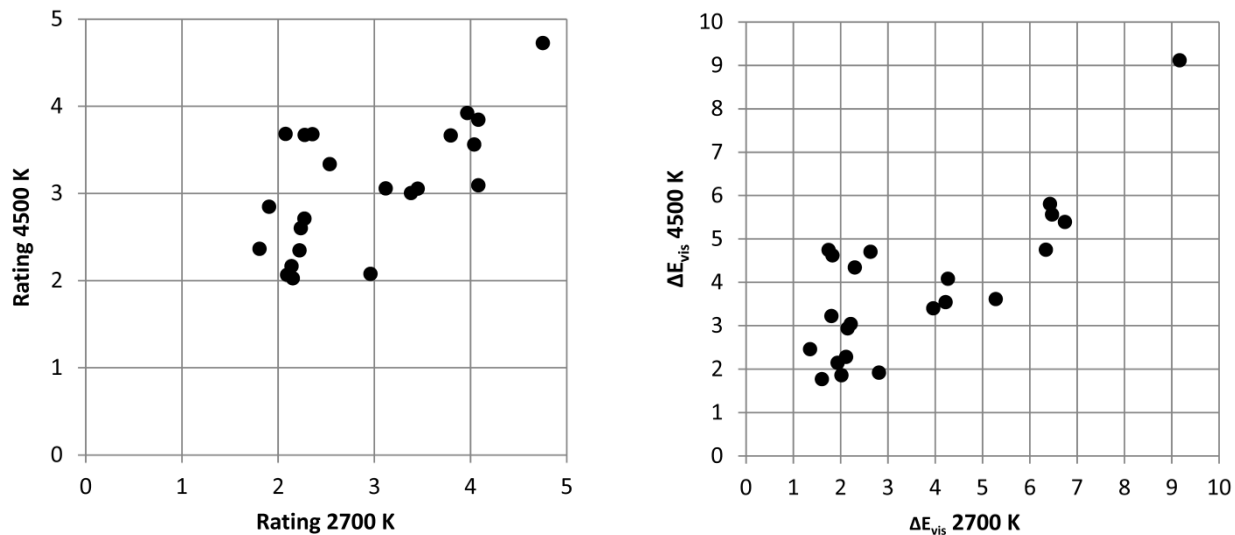


Abbildung A.3: Vergleich der visuellen Bewertungen *Rating* (links;  $R^2=0,42$ ;  $p=0,0048$ ) und  $\Delta E_{vis}$  (rechts;  $R^2=0,63$ ;  $p<0,001$ ) beider CCTs; Zuordnung im CIECAM02-UCS-Farbraum

## Tabletop

### Stabilität der Lichtquellen

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der versuchsbegleitenden Leuchtdichtemessung mit Hilfe der Technoteam LMK98/4 -Kamera. Für jede Testperson ( $N=28$ ) und Lichtquelle ( $N=11$ ) wurde ein High Dynamic Range (HDR) Farbbild aufgenommen. Dargestellt sind die Mittelwerte (bzw. Maxima, Minima usw.) über alle Versuchstage.

Der Mittelwert aller Lichtquellen über alle Versuchstage beträgt  $205 \text{ cd/m}^2$ . Die Schwankungen der protokollierten Leuchtdichten über die Versuchstage fallen für die einzelnen Lichtquellen unterschiedlich groß aus. Während die Referenzlichtquelle (Halogenlampen) sowie Lichtquelle 2 (reine RGB-LED-Mischung, vgl. Tabelle 4.12) kleine Standardabweichungen und Konfidenzintervalle aufweisen, liegen die Werte für die restlichen Testlichtquellen deutlich höher. Diese Lichtquellen stellen Mischungen auf RGB- und weißen LEDs dar (siehe Tabelle 5.3 auf Seite 94).

Tabelle A.1: Leuchtdichtestabilität während der Versuchsdurchführung

Lichtquelle	Mittelwert [cd/m <sup>2</sup> ]	Maximum [cd/m <sup>2</sup> ]	Minimum [cd/m <sup>2</sup> ]	Standard- abweichung [cd/m <sup>2</sup> ]	95% Konfidenz- intervall [cd/m <sup>2</sup> ]
Referenz	208,9	224,0 +7,2%	202,9 -2,9%	5,16	2,29 1,1%
1	201,4	231,3 +14,8%	175,8 -12,7%	17,60	7,80 3,9%
2	204,7	223,3 +9,1%	193,5 -5,5%	7,49	3,32 1,6%
3	208,2	235,5 +13,1%	176,1 -15,4%	20,17	8,94 4,3%
4	202,4	235,6 +16,4%	176,9 -12,6%	20,16	8,94 4,4%
5	204,9	224,7 +9,6%	181,9 -11,2%	14,39	6,38 3,1%
6	201,9	223,6 +10,7%	183,4 -9,2%	10,94	4,85 2,4%
7	207,3	228,3 +10,1%	174,8 -15,7%	20,55	9,11 4,4%
8	201,9	224,1 +11,0%	177,8 -11,9%	15,34	6,80 3,4%
9	206,7	239,7 +15,9%	175,7 -15,0%	21,03	9,32 4,5%
10	206,2	232,0 +12,5%	176,1 -14,6%	17,03	7,55 3,7%
	<b>205,0</b>	<b>229,3</b> <b>+11,9%</b>	<b>181,4</b> <b>-11,5%</b>	<b>15,44</b>	<b>6,85</b> <b>3,3%</b>

## Ergebnisse für die einzelnen Testobjekte

Die folgenden Diagramme zeigen den Zusammenhang zwischen visueller Bewertung *Rating* und der gemessenen Farbdifferenz  $\Delta E_{CI\text{ECAM}02-UCS}$ , gruppiert in Intervallen der Größe 0,5 (z. B.  $\Delta E = 1 \dots 1,5$ ). Es entstehen maximal 10 Datenpunkte (10 Lichtquellen), wenn mehrere Lichtquellen in das gleiche  $\Delta E$ -Intervall fallen entsprechend weniger Datenpunkte. Jeder Punkt repräsentiert somit den Mittelwert der Bewertungen von 28 Testpersonen (oder ein Vielfaches davon:  $N=28, 56$  usw.), die Fehlerbalken stellen die einfache Standardabweichung dar.



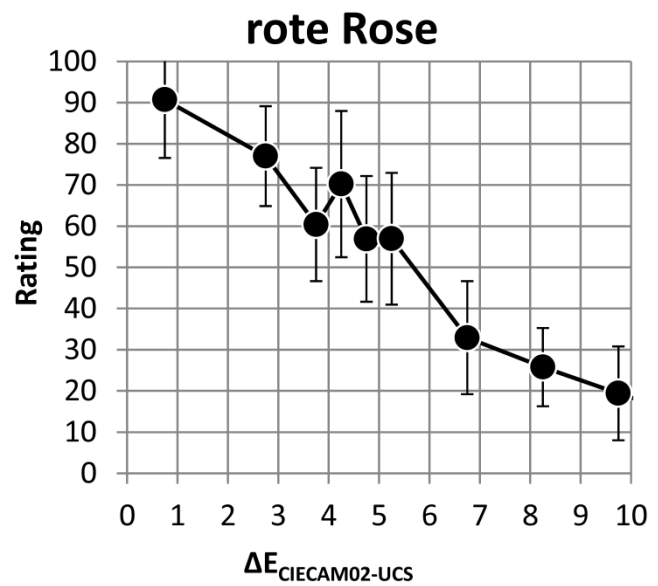
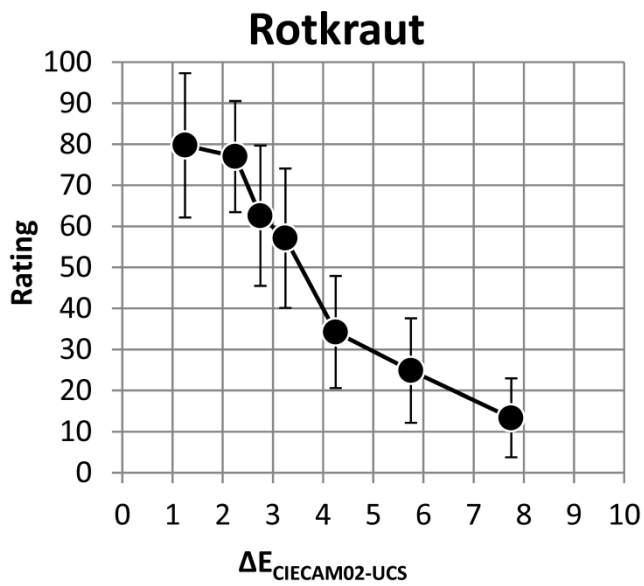


Abbildung A.4: Ergebnis für Testobjekt 1 (Rotkraut, künstlich) und Testobjekt 2 (rote Rose, künstlich)

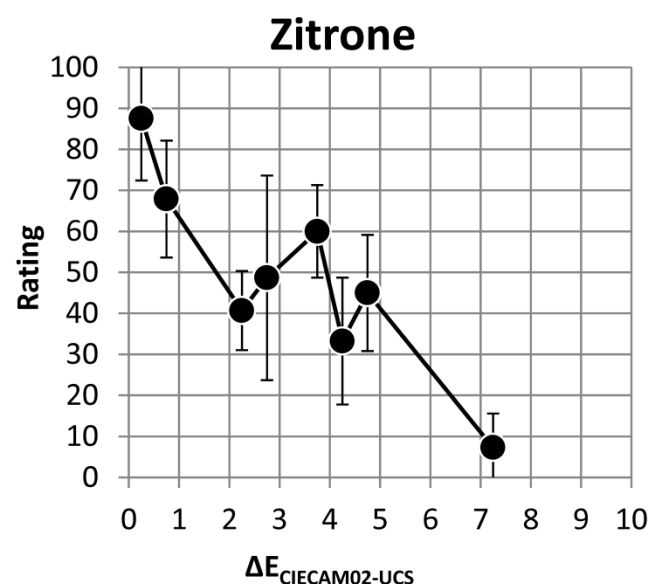
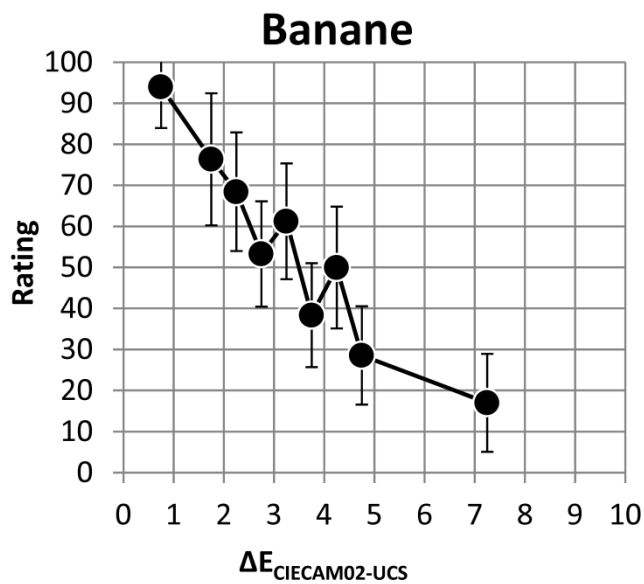


Abbildung A.5: Ergebnis für Testobjekt 3 (Banane, natürlich) und Testobjekt 4 (Zitrone, künstlich)

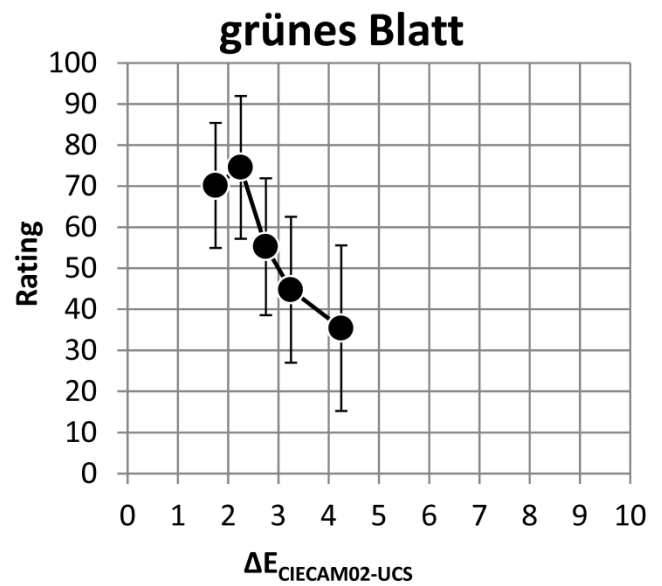
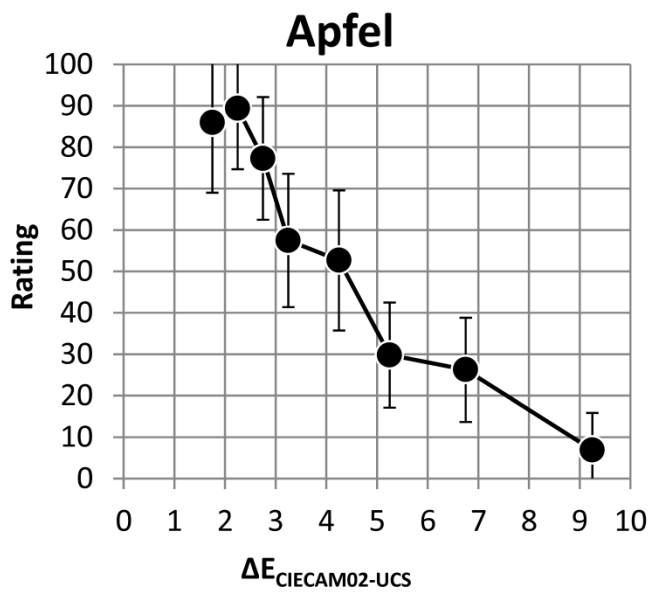


Abbildung A.6: Ergebnis für Testobjekt 5 (Apfel, künstlich) und Testobjekt 6 (grünes Blatt, künstlich)

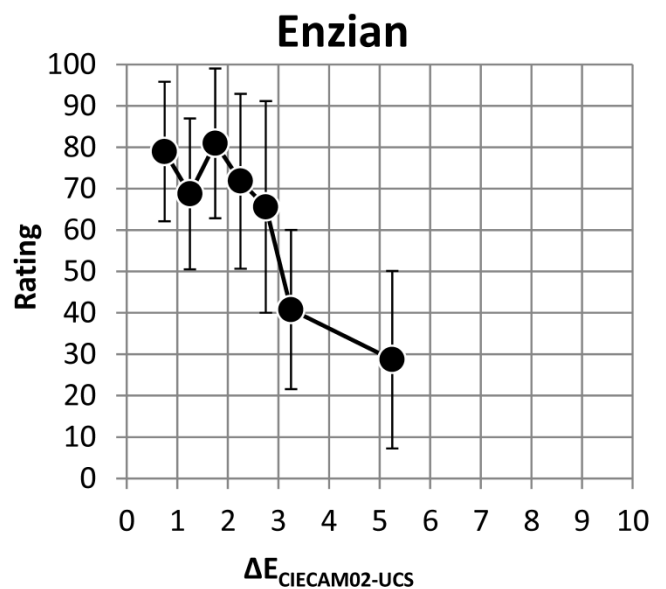
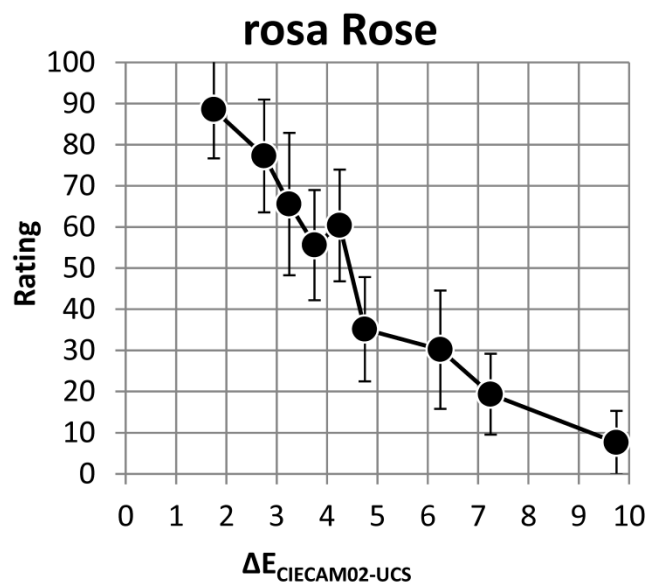


Abbildung A.7: Ergebnis für Testobjekt 7 (rosa Rose, natürlich) und Testobjekt 8 (Enzian, künstlich)

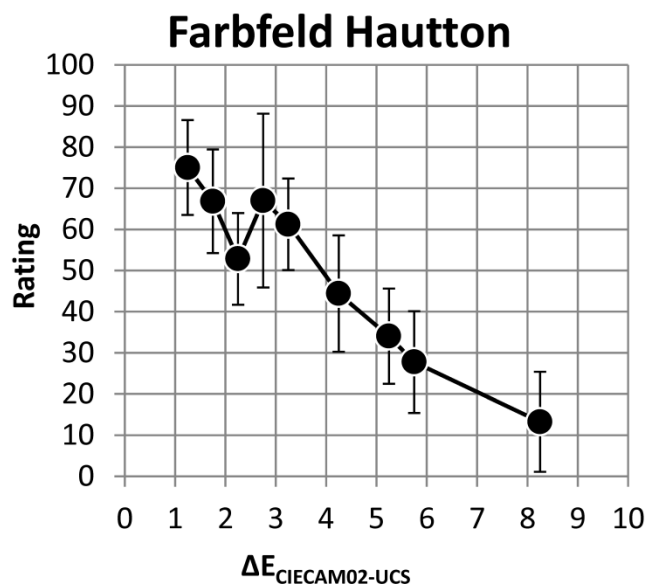
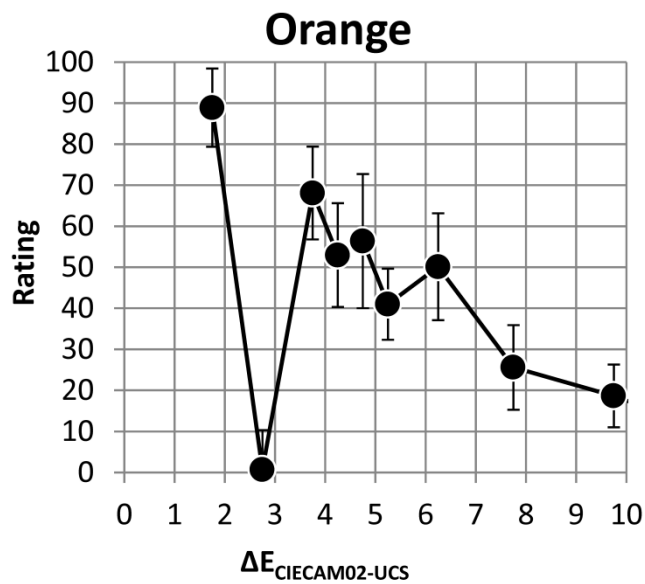


Abbildung A.8: Ergebnis für Testobjekt 9 (Orange, natürlich) und Testobjekt 10 (Farbfeld Hutton)

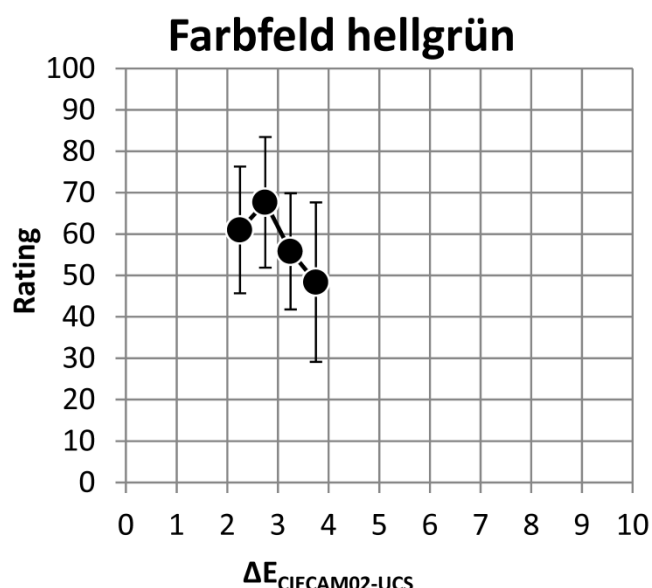
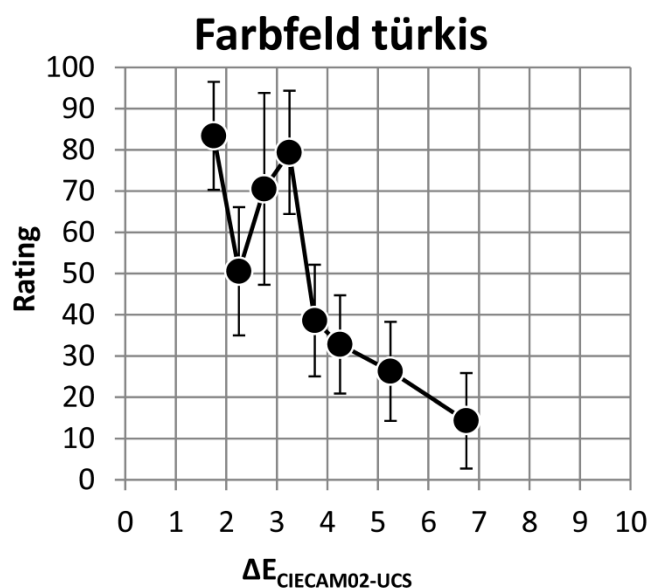


Abbildung A.9: Ergebnis für Testobjekt 11 (Farbfeld türkis) und Testobjekt 12 (Farbfeld hellgrün)

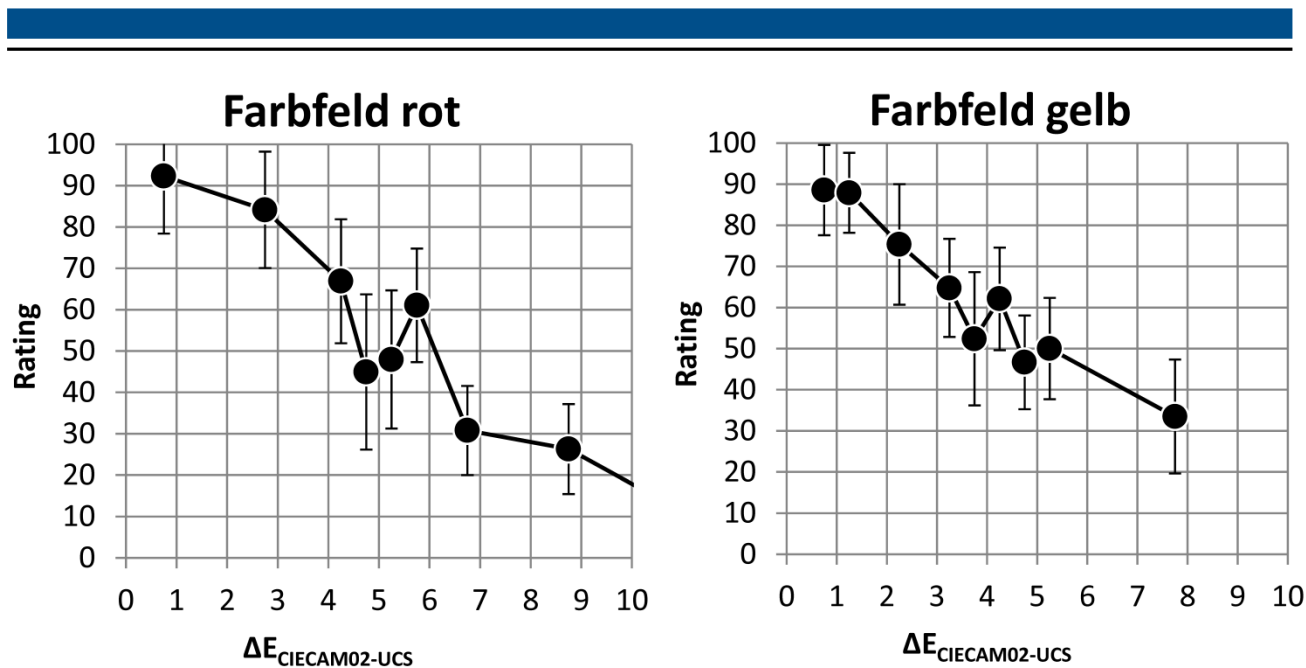


Abbildung A.10: Ergebnis für Testobjekt 13 (Farbfeld rot) und Testobjekt 14 (Farbfeld gelb)

### Ergebnisse nach Objekt-Buntton

Tabelle A.2: Bestimmtheitsmaße für den Gesamt-Fit und individuell gefittete Funktionen jeder Bunttongruppe

		Rot	Orange	Gelb	Grün	Türkis	Blau	Violett
Objekte		rote Rose FF rot rosa Rose	Orange Apfel FF Haut	FF gelb Zitrone Banane	FF hellgr. gr. Blatt	FF türkis	Enzian	Rotkraut
Fit gesamt $c = 0,045$	$R^2$	0,94	0,90	0,81	0,96	0,73	0,84	0,96
	$p$	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,007	0,004	<0,001
Fit individuell	$c$	0,06	0,06	0,08	0,1	0,1	0,1	0,08
	$R^2$	0,94	0,90	0,85	0,95	0,74	0,85	0,98
	$p$	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,006	0,003	<0,001

In den folgenden Abbildungen ist neben der in Abschnitt 5.2 extrahierten Gesamt-Fit-Funktion mit Konstante  $c = 0,045$  (durchgezogene Kurve) auch eine für jede Bunttongruppe individuell gefittete Funktion (gestrichelte Kurve) zu sehen. Dabei wurde der Parameter  $c$  in der folgenden Formel variiert.

$$R = \frac{100}{\sqrt{e^{c \cdot \Delta E^2}}} \quad \text{Formel A.1}$$

Einen Überblick über die gefundenen  $c$ -Werte und die resultierenden Bestimmungsmaße gibt die obenstehende Tabelle. Für die meisten Bunttongruppen kann durch eine individuelle Bestimmung von  $c$  eine leichte Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  erreicht werden. Die gestrichelten Kurven (individuelles  $c$ ) liegen besser innerhalb der Fehlerbalken (einfache Standardabweichung) der visuellen Bewertungen als die durchgezogene Linie (Gesamt-Fit,  $c = 0,045$ ).

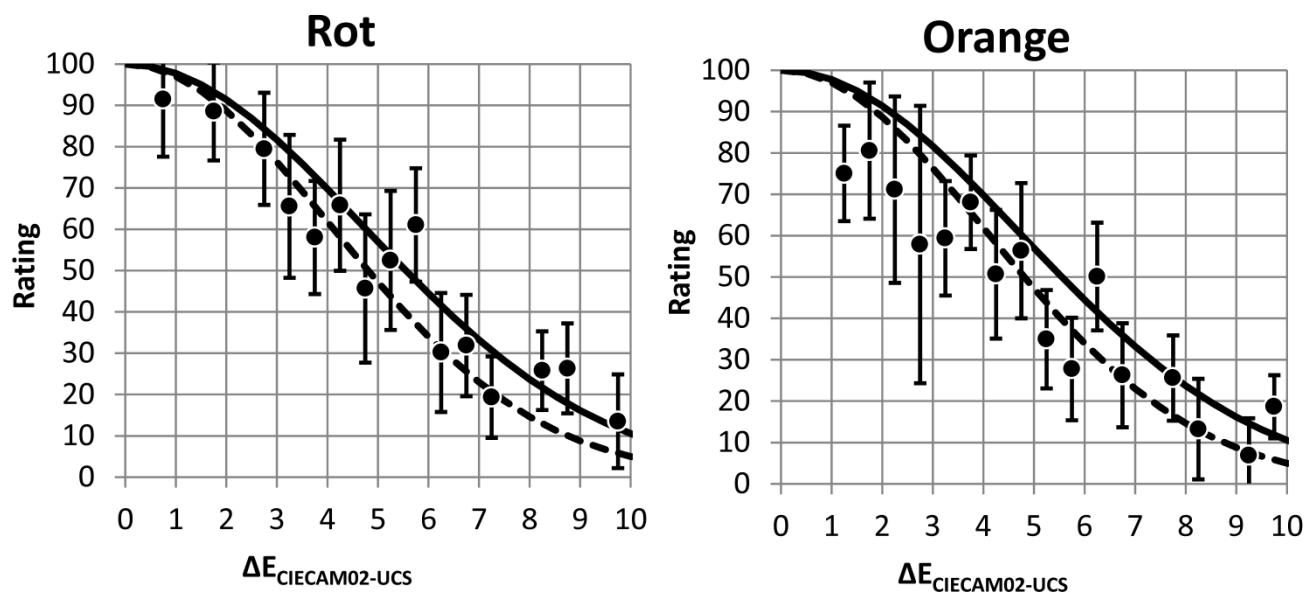


Abbildung A.11: Ergebnis für die Bunttongruppen Rot und Orange

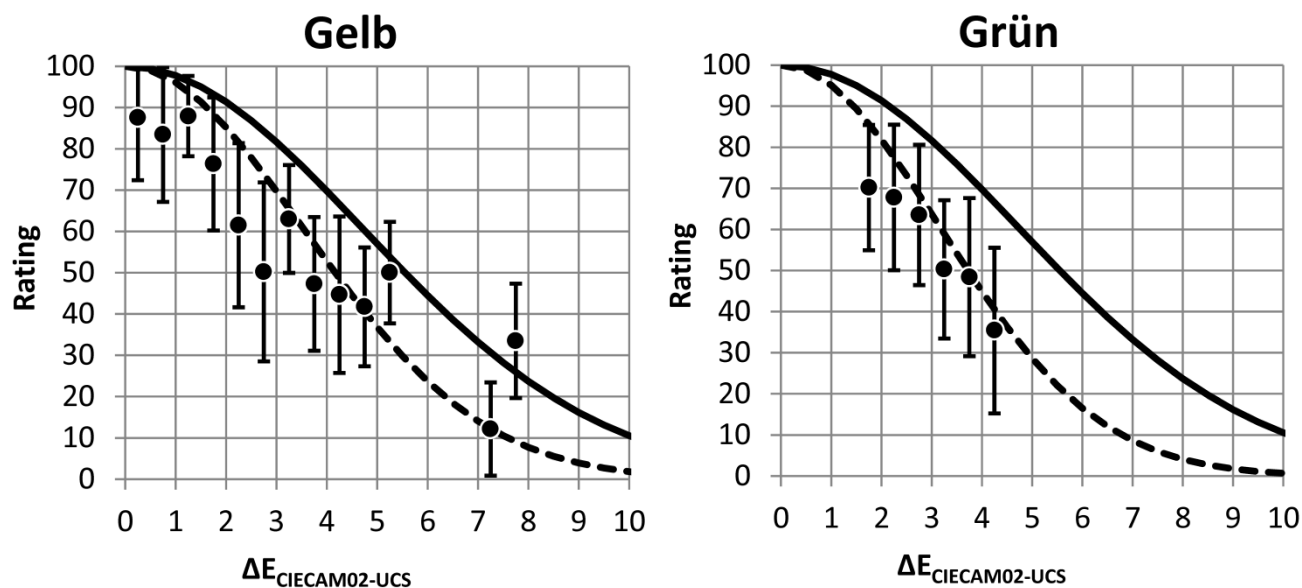
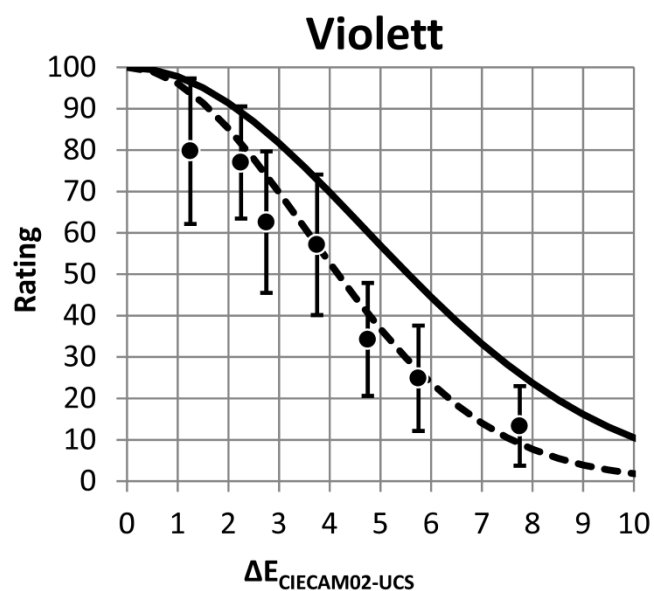
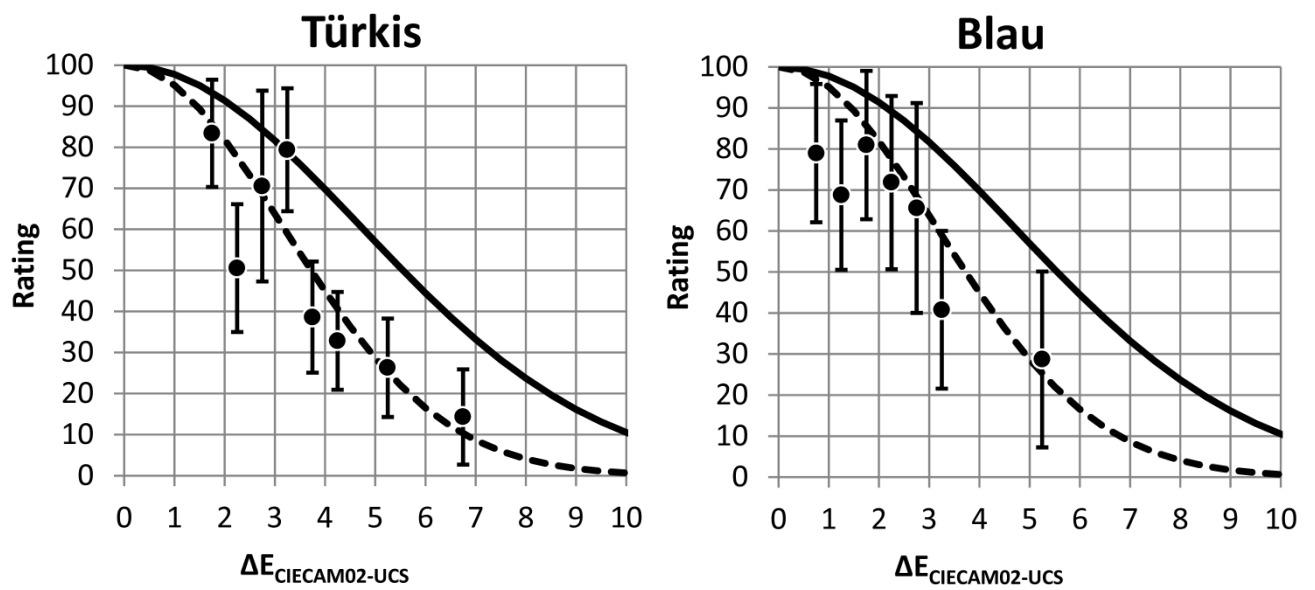


Abbildung A.12: Ergebnis für die Bunttongruppen Gelb und Grün



## Farbwiedergabe mit LED

Die folgenden Tabellen zeigen die berechneten Ankerpunkte für die Kategorien (Mittelpunkt der Kategorie, nicht die Grenze zwischen zwei Kategorien) auf der CRI-Skala. Die zweite Spalte („800 · Δuv“) zeigt das Ergebnis entsprechend Formel 2.8, die vierte Spalte („CRI 1965“) den entsprechend Formel 2.10 daraus errechneten Indexwert. Analog dazu enthält die dritte Spalte das Zwischenergebnis für die CRI-Definition 1995 nach Formel 2.21 und die fünfte Spalte („CRI 1995“) den Indexwert nach Formel 2.10. Die Werte wurden für acht Farbzentren (2700 K ... 6500 K) berechnet.

Tabelle A.3: CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 2700 K

	2700 K			
	800 · Δuv	ΔE <sub>U*V*W</sub> * 1995	CRI 1965	CRI 1995
ausgezeichnet	0,83	1,33	96,2	93,9
sehr gut	1,65	2,66	92,4	87,8
gut	2,59	4,18	88,1	80,8
mäßig	4,24	6,83	80,5	68,6
gering	5,03	8,09	76,9	62,8
schlecht	6,23	10,03	71,3	53,9
sehr schlecht	7,94	12,78	63,5	41,2

Tabelle A.4: CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 3000 K

	3000 K			
	800 · Δuv	ΔE <sub>U*V*W</sub> * 1995	CRI 1965	CRI 1995
ausgezeichnet	0,82	1,32	96,2	93,9
sehr gut	1,63	2,62	92,5	88,0
gut	2,53	4,07	88,4	81,3
mäßig	4,19	6,75	80,7	69,0
gering	4,99	8,03	77,1	63,1
schlecht	6,21	10,00	71,4	54,0
sehr schlecht	7,95	12,79	63,4	41,2

Tabelle A.5: CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 3500 K

	3500 K			
	$800 \cdot \Delta uv$	$\Delta E_{U^*V^*W^* 1995}$	CRI 1965	CRI 1995
ausgezeichnet	0,81	1,30	96,3	94,0
sehr gut	1,57	2,53	92,8	88,4
gut	2,45	3,95	88,7	81,9
mäßig	4,14	6,66	81,0	69,4
gering	4,94	7,95	77,3	63,4
schlecht	6,19	9,96	71,5	54,2
sehr schlecht	7,95	12,80	63,4	41,1

Tabelle A.6: CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 4000 K

	4000 K			
	$800 \cdot \Delta uv$	$\Delta E_{U^*V^*W^* 1995}$	CRI 1965	CRI 1995
ausgezeichnet	0,77	1,25	96,4	94,3
sehr gut	1,48	2,39	93,2	89,0
gut	2,37	3,81	89,1	82,5
mäßig	4,08	6,56	81,2	69,8
gering	4,90	7,88	77,5	63,7
schlecht	6,16	9,92	71,6	54,4
sehr schlecht	7,96	12,80	63,4	41,1

Tabelle A.7: CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 4500 K

	4500 K			
	$800 \cdot \Delta uv$	$\Delta E_{U^*V^*W^* 1995}$	CRI 1965	CRI 1995
ausgezeichnet	0,72	1,16	96,7	94,7
sehr gut	1,40	2,25	93,6	89,6
gut	2,29	3,69	89,5	83,0
mäßig	4,02	6,48	81,5	70,2
gering	4,85	7,81	77,7	64,1
schlecht	6,14	9,88	71,8	54,6
sehr schlecht	7,95	12,79	63,4	41,1



Tabelle A.8: CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 5000 K

	5000 K			
	$800 \cdot \Delta uv$	$\Delta E_{U^*V^*W^* 1995}$	CRI 1965	CRI 1995
ausgezeichnet	0,65	1,05	97,0	95,2
sehr gut	1,33	2,13	93,9	90,2
gut	2,23	3,58	89,8	83,5
mäßig	3,97	6,39	81,7	70,6
gering	4,81	7,74	77,9	64,4
schlecht	6,10	9,82	71,9	54,8
sehr schlecht	7,93	12,77	63,5	41,3

Tabelle A.9: CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 5700 K

	5700 K			
	$800 \cdot \Delta uv$	$\Delta E_{U^*V^*W^* 1995}$	CRI 1965	CRI 1995
ausgezeichnet	0,57	0,92	97,4	95,8
sehr gut	1,24	1,99	94,3	90,8
gut	2,14	3,44	90,2	84,2
mäßig	3,89	6,26	82,1	71,2
gering	4,73	7,61	78,3	65,0
schlecht	6,03	9,70	72,3	55,4
sehr schlecht	7,87	12,67	63,8	41,7

Tabelle A.10: CRI-Werte für die Kategorien, Farbzentrum 6500 K

	6500 K			
	$800 \cdot \Delta uv$	$\Delta E_{U^*V^*W^* 1995}$	CRI 1965	CRI 1995
ausgezeichnet	0,51	0,82	97,7	96,2
sehr gut	1,13	1,82	94,8	91,6
gut	2,02	3,25	90,7	85,1
mäßig	3,77	6,06	82,7	72,1
gering	4,61	7,42	78,8	65,9
schlecht	5,92	9,53	72,8	56,2
sehr schlecht	7,77	12,51	64,2	42,5

## Darstellung in der CIE 1931 $xy$ -Farbtafel

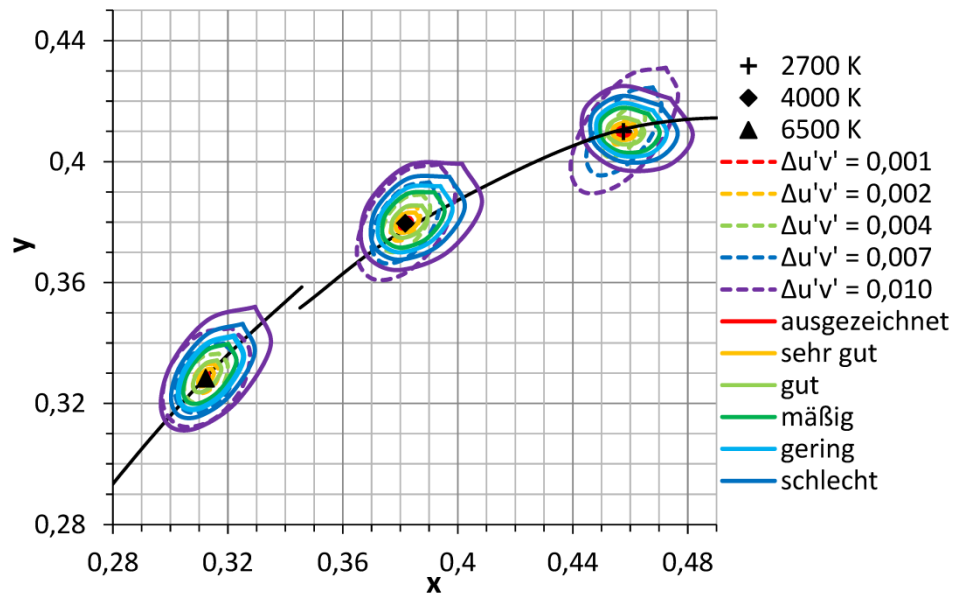


Abbildung A.15: Vergleich für drei Farbzentren in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel

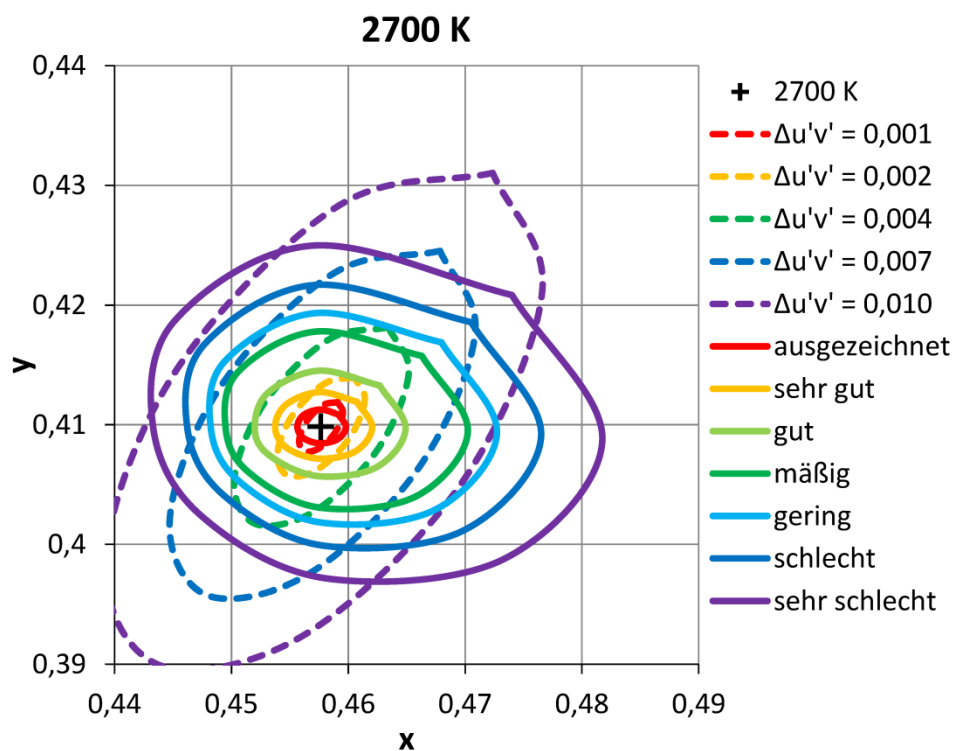


Abbildung A.16: Vergleich für das Farbzentrum 2700 K in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel

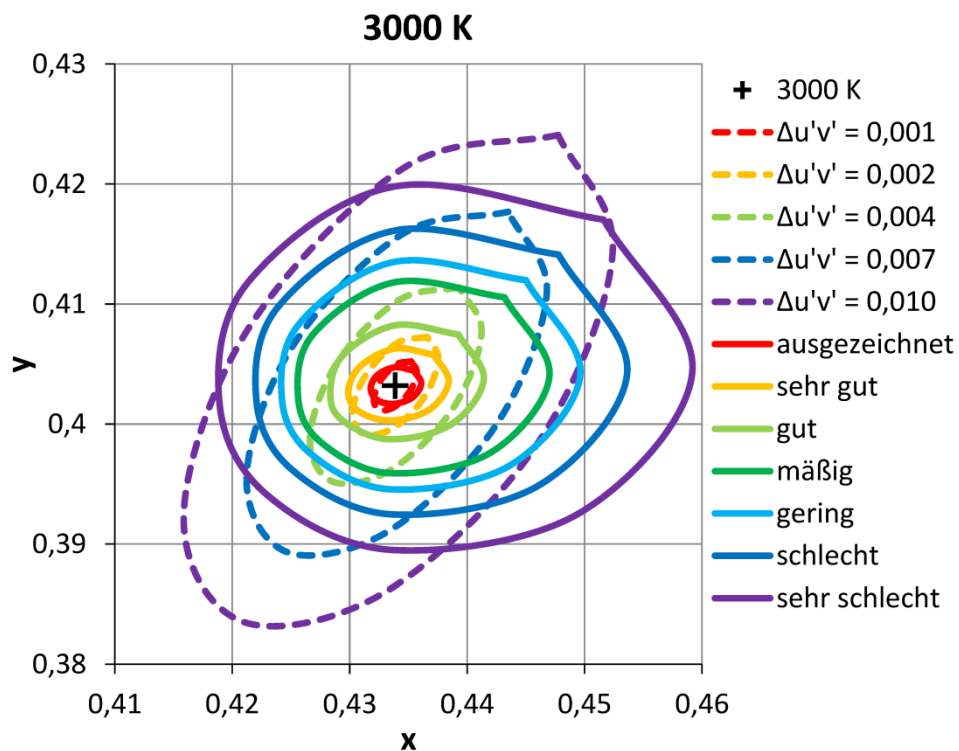


Abbildung A.17: Vergleich für das Farbzentrum 3000 K in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel

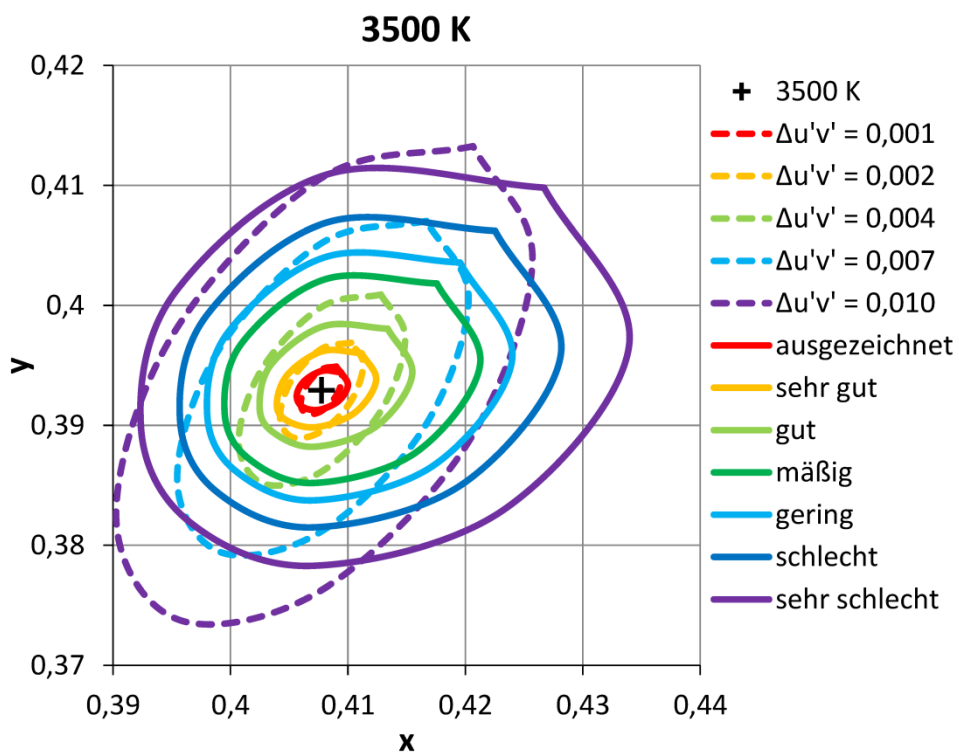


Abbildung A.18: Vergleich für das Farbzentrum 3500 K in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel

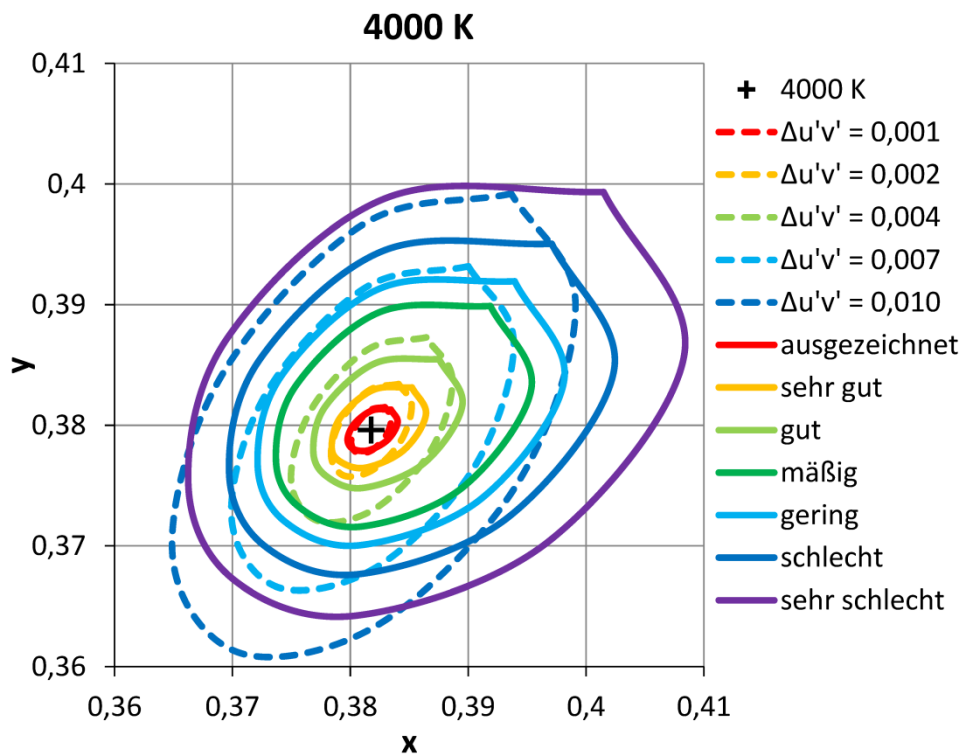


Abbildung A.19: Vergleich für das Farbzentrum 4000 K in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel

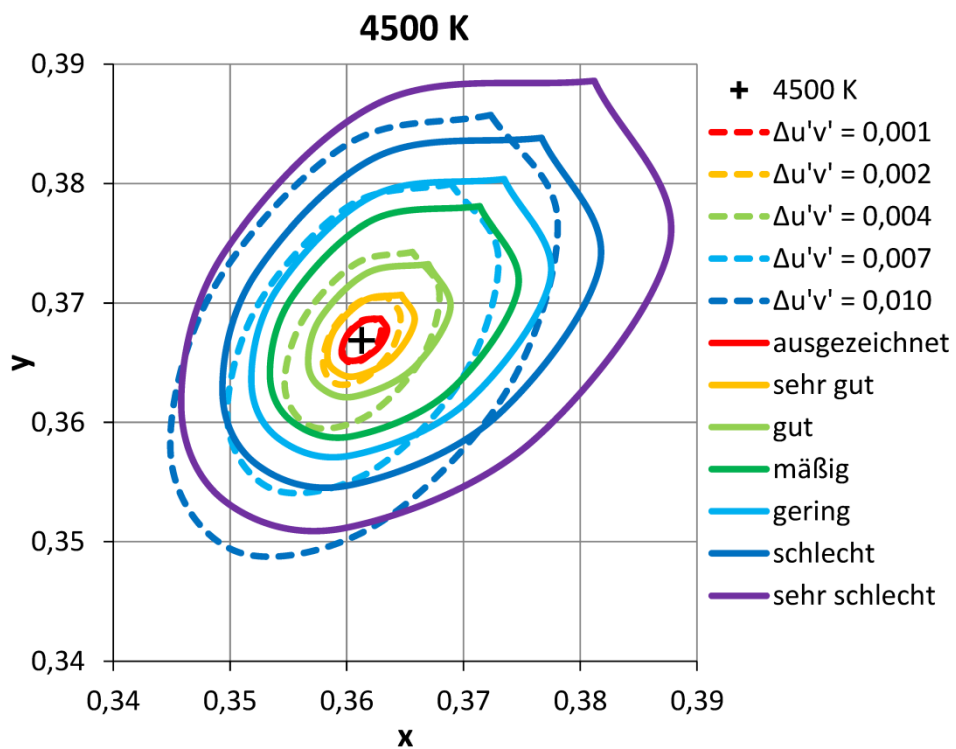


Abbildung A.20: Vergleich für das Farbzentrum 4500 K in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel

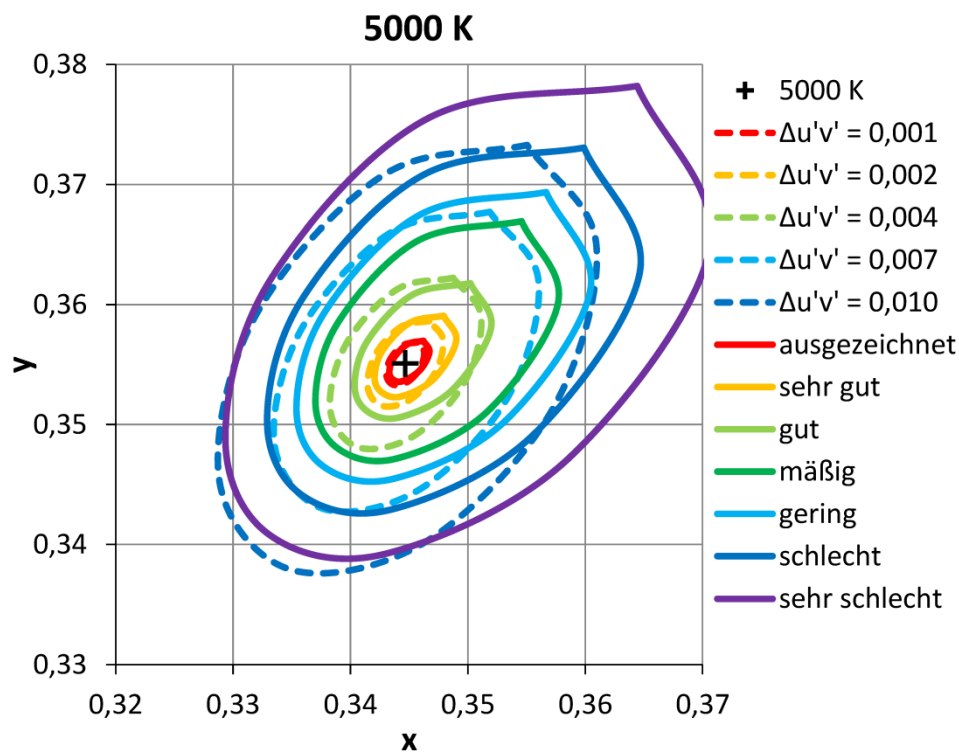


Abbildung A.21: Vergleich für das Farbzentrum 5000 K in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel

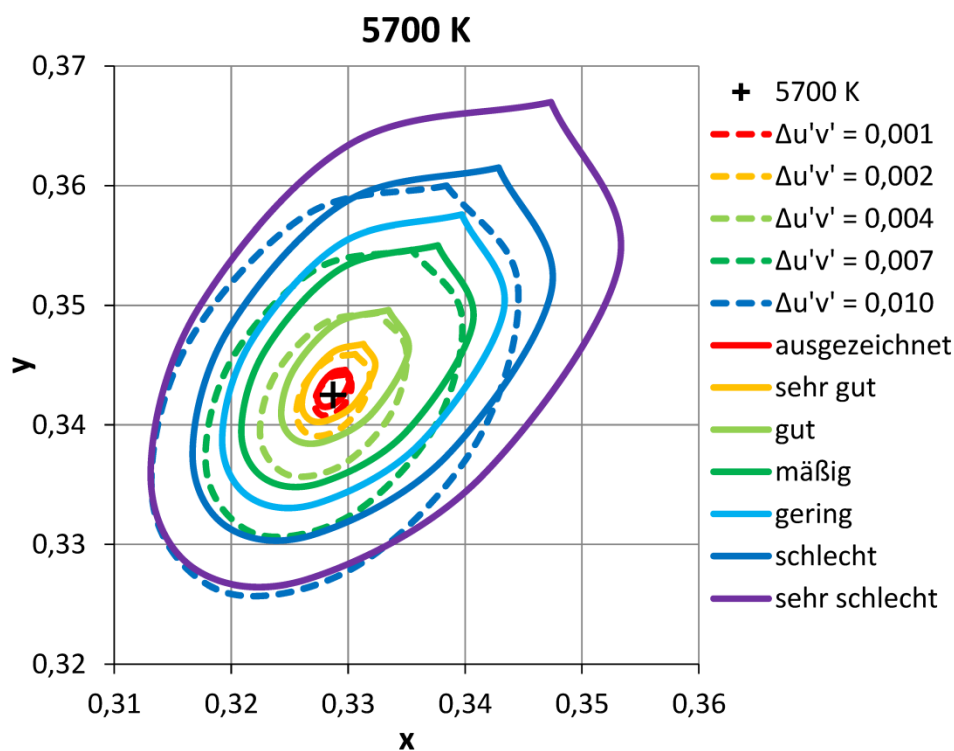


Abbildung A.22: Vergleich für das Farbzentrum 5700 K in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel

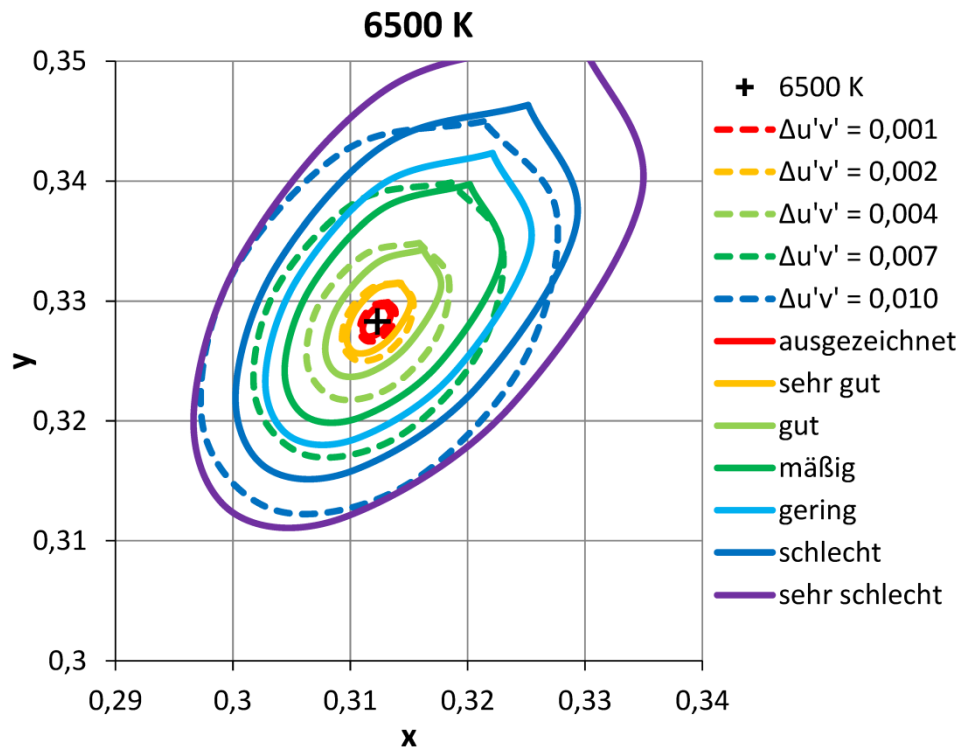


Abbildung A.23: Vergleich für das Farbzentrum 6500 K in der CIE 1931  $xy$ -Farbtafel

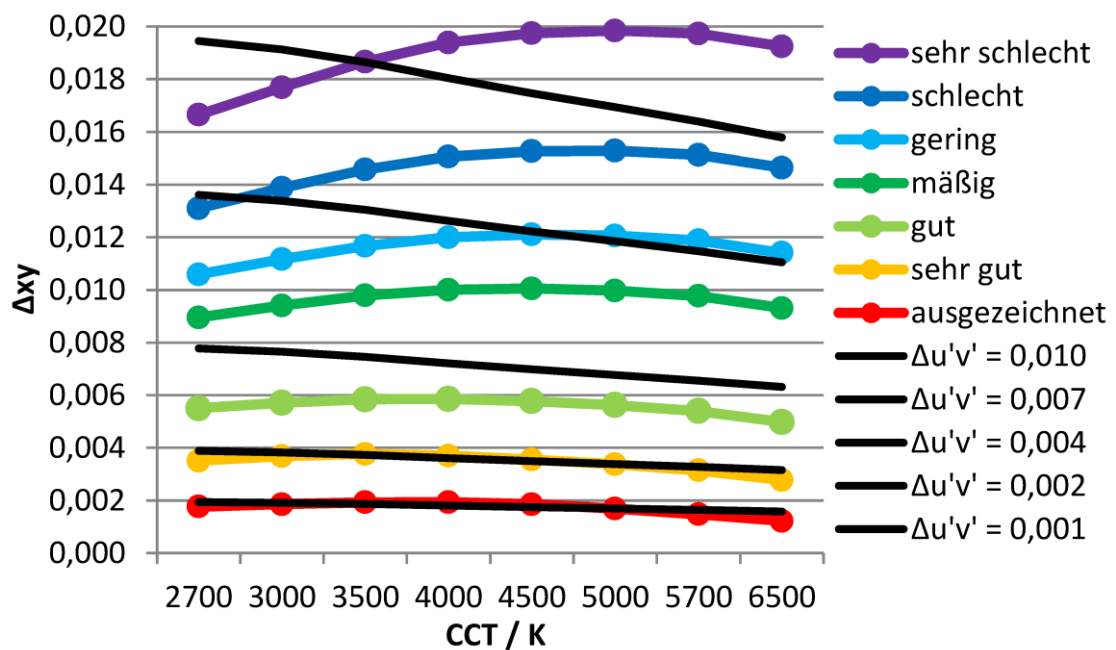


Abbildung A.24: Übersicht der Farbdifferenzen  $\Delta xy$

## Darstellung in der CIE 1976 $u'v'$ -Farbtafel

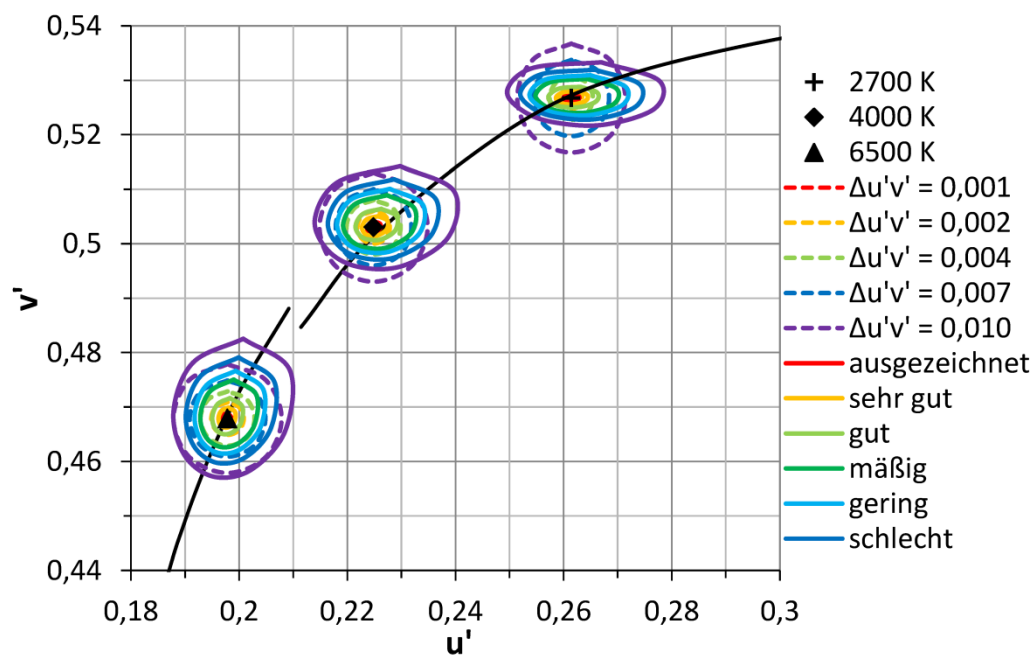


Abbildung A.25: Vergleich für drei Farbzentren in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel

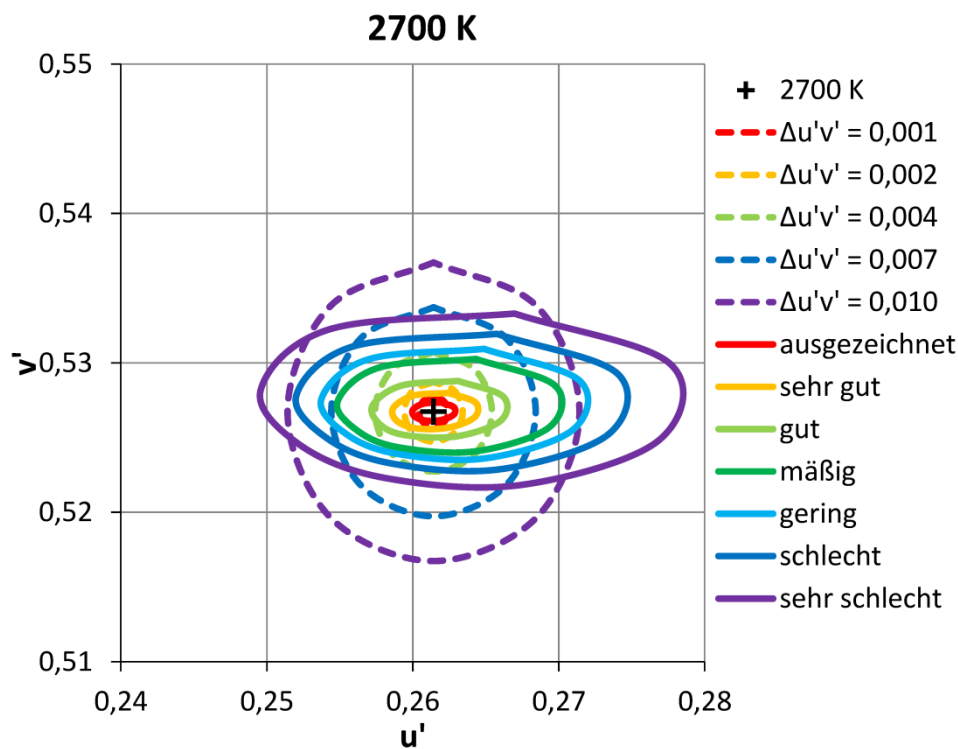


Abbildung A.26: Vergleich für das Farbzentrum 2700 K in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel

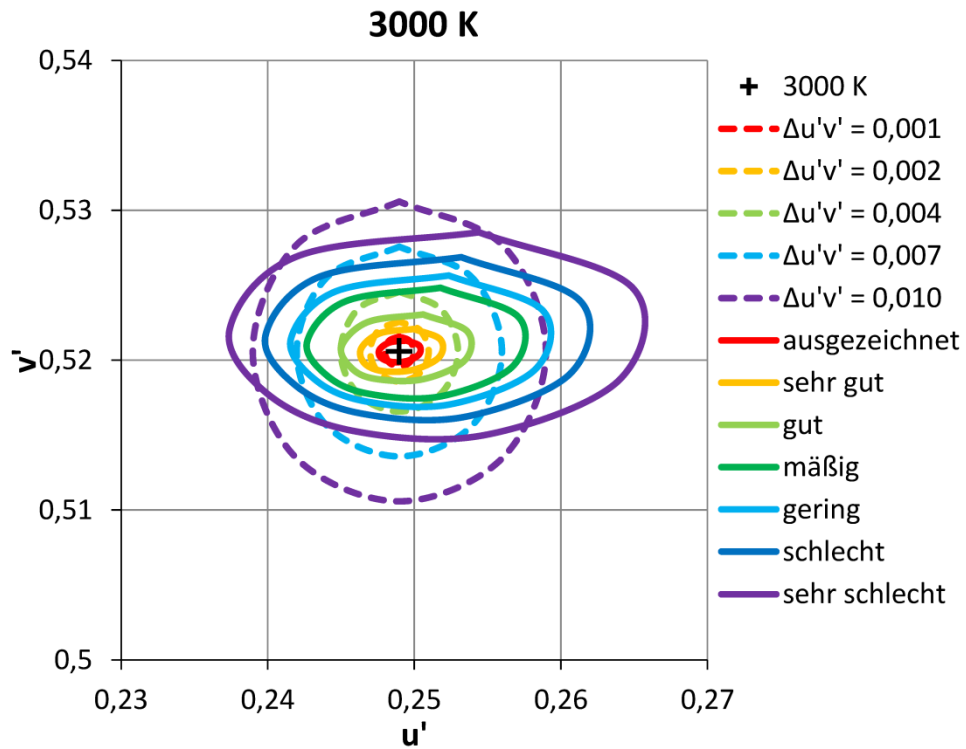


Abbildung A.27: Vergleich für das Farbzentrum 3000 K in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel

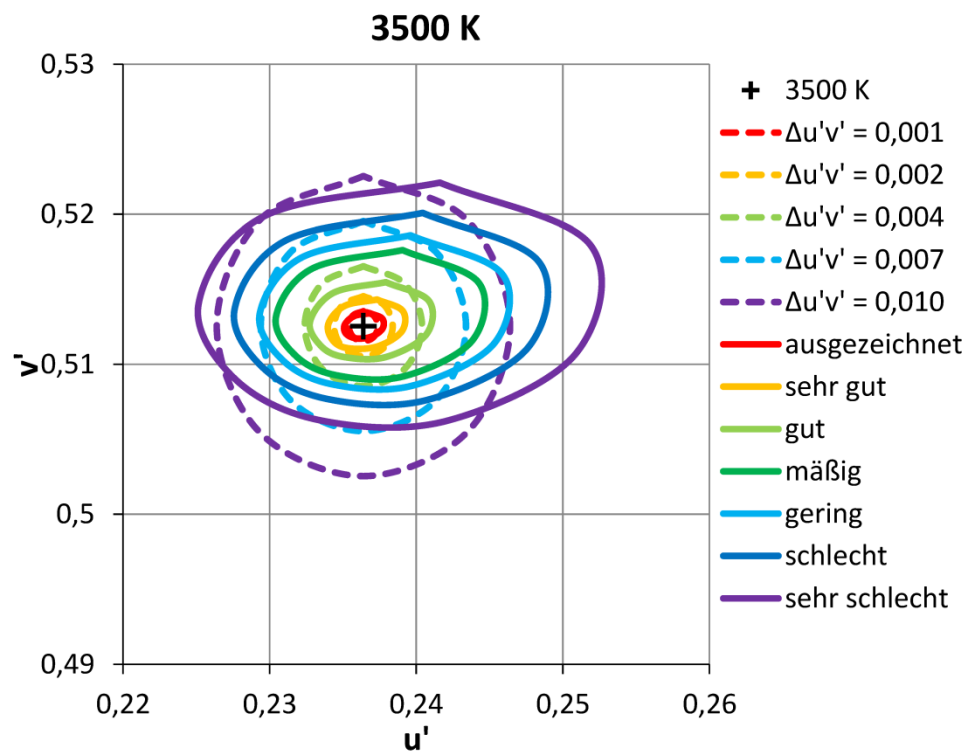


Abbildung A.28: Vergleich für das Farbzentrum 3500 K in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel



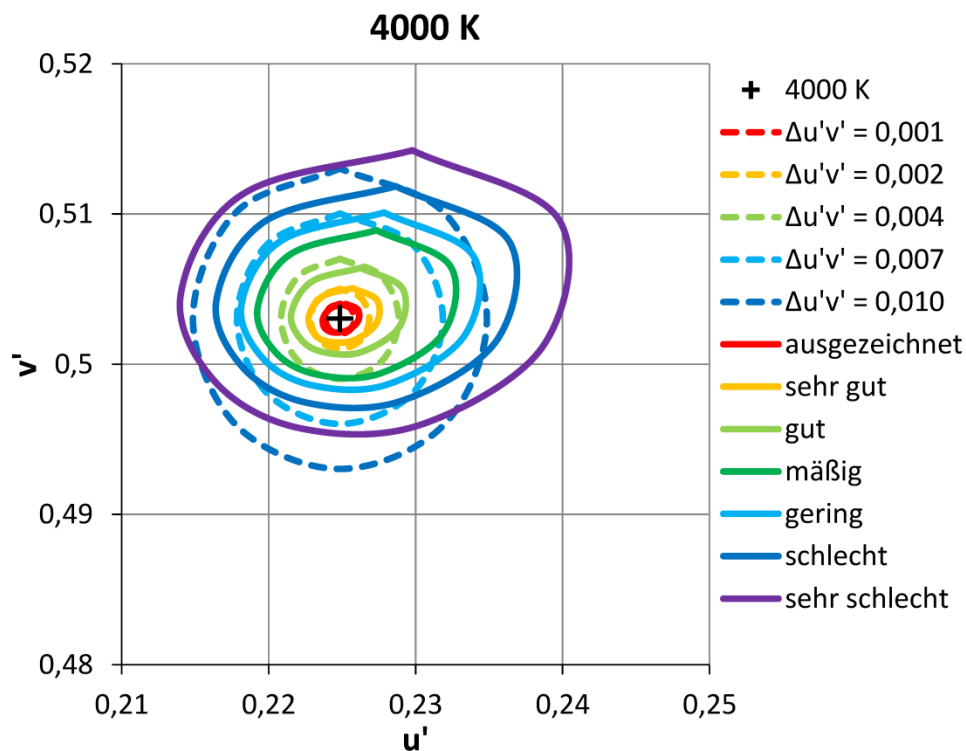


Abbildung A.29: Vergleich für das Farbzentrum 4000 K in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel

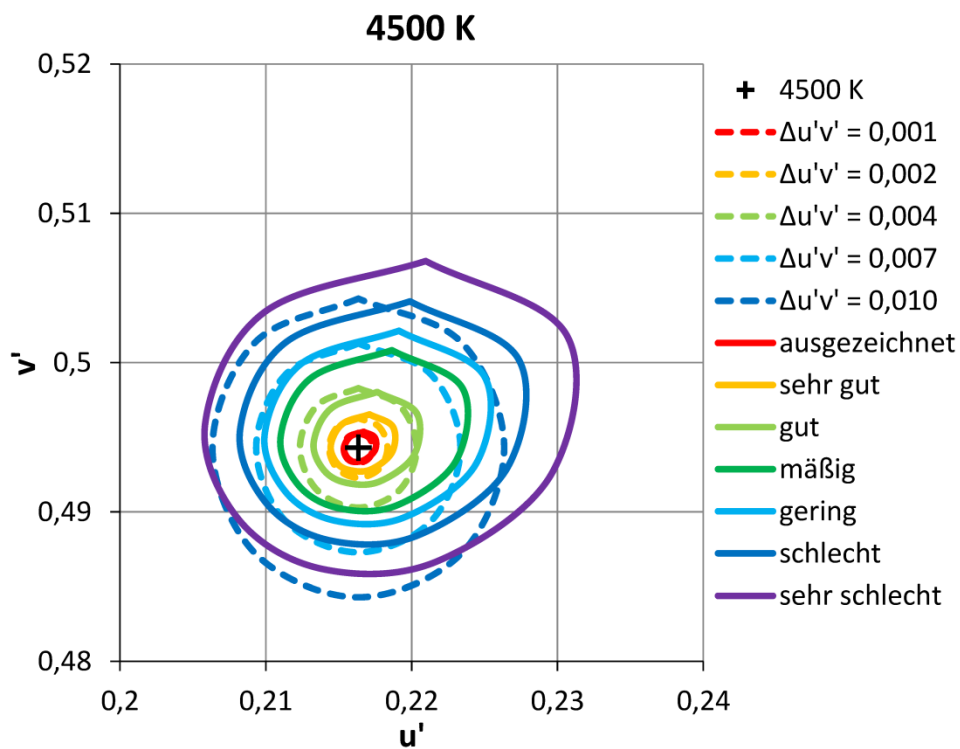


Abbildung A.30: Vergleich für das Farbzentrum 4500 K in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel

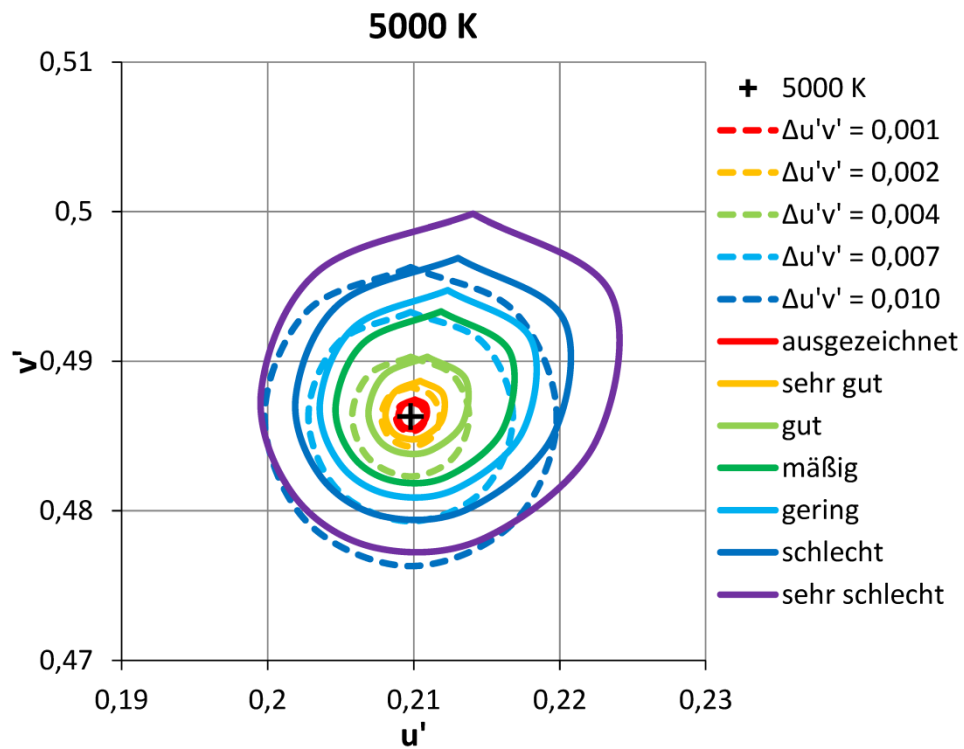


Abbildung A.31: Vergleich für das Farbzentrum 5000 K in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel

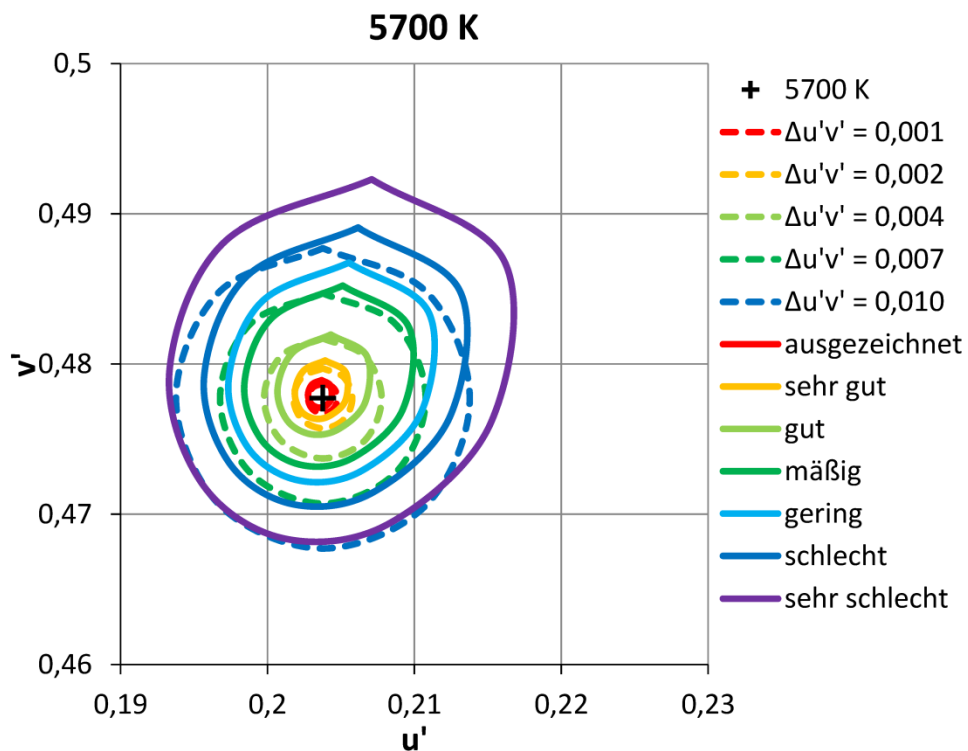


Abbildung A.32: Vergleich für das Farbzentrum 5700 K in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel

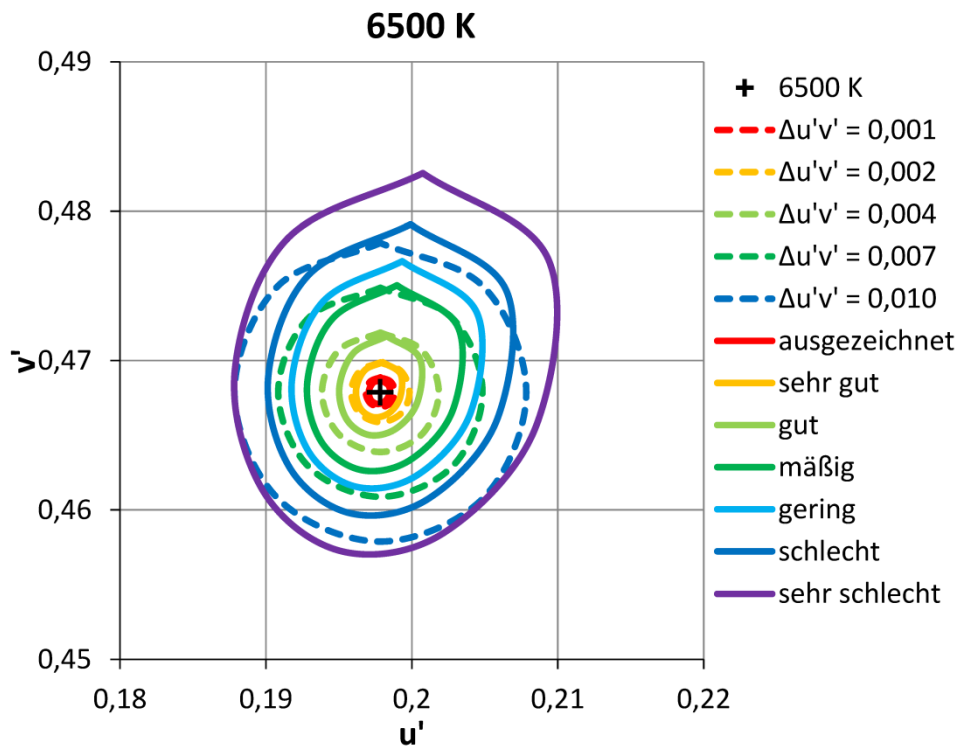


Abbildung A.33: Vergleich für das Farbzentrum 6500 K in der CIE 1976  $u'v'$ -Farbtafel

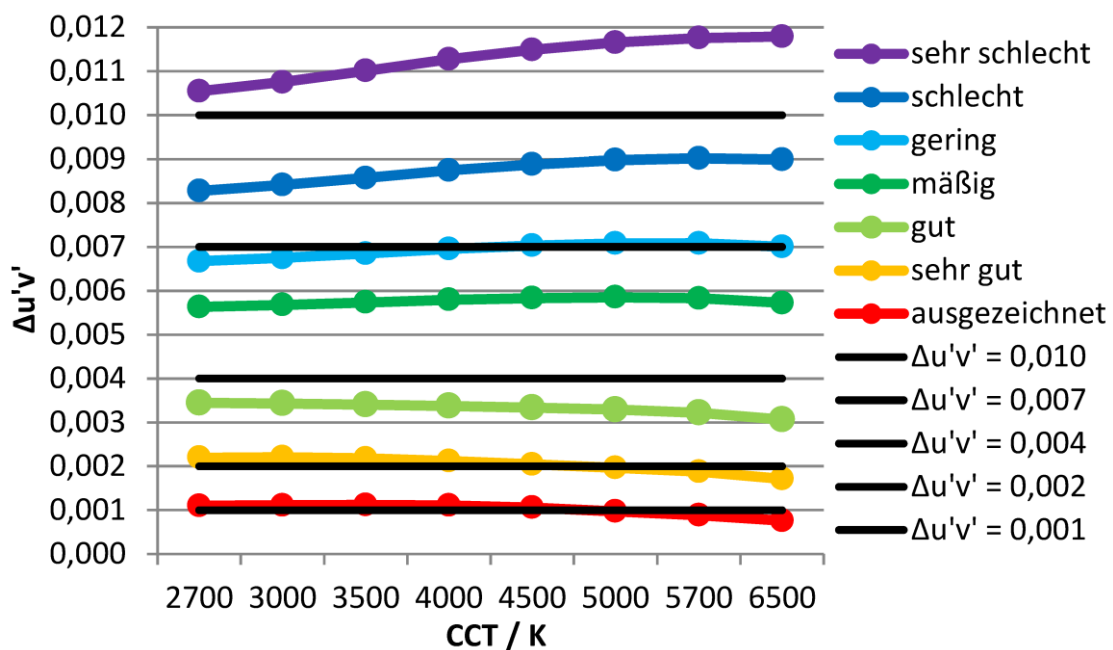


Abbildung A.34: Übersicht der Farbdifferenzen  $\Delta u'v'$

## Darstellung in der CIECAM02-UCS $a'b'$ -Farbebene

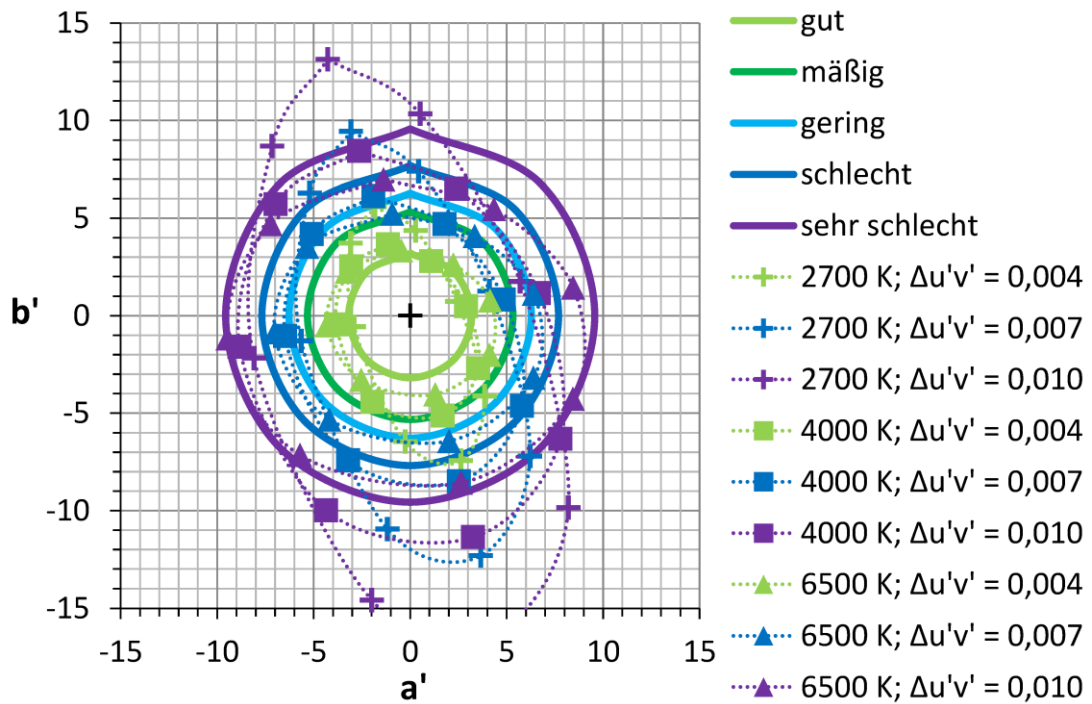


Abbildung A.35: Vergleich für drei Farbzentren in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene (Teil 1)

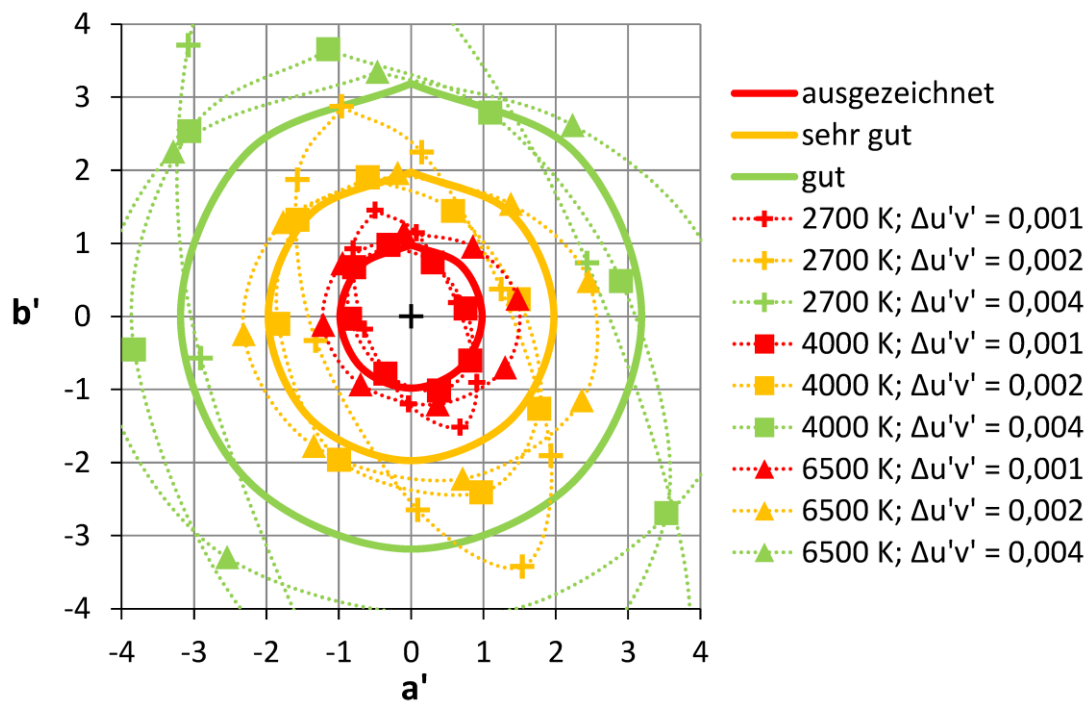


Abbildung A.36: Vergleich für drei Farbzentren in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene (Teil 2)

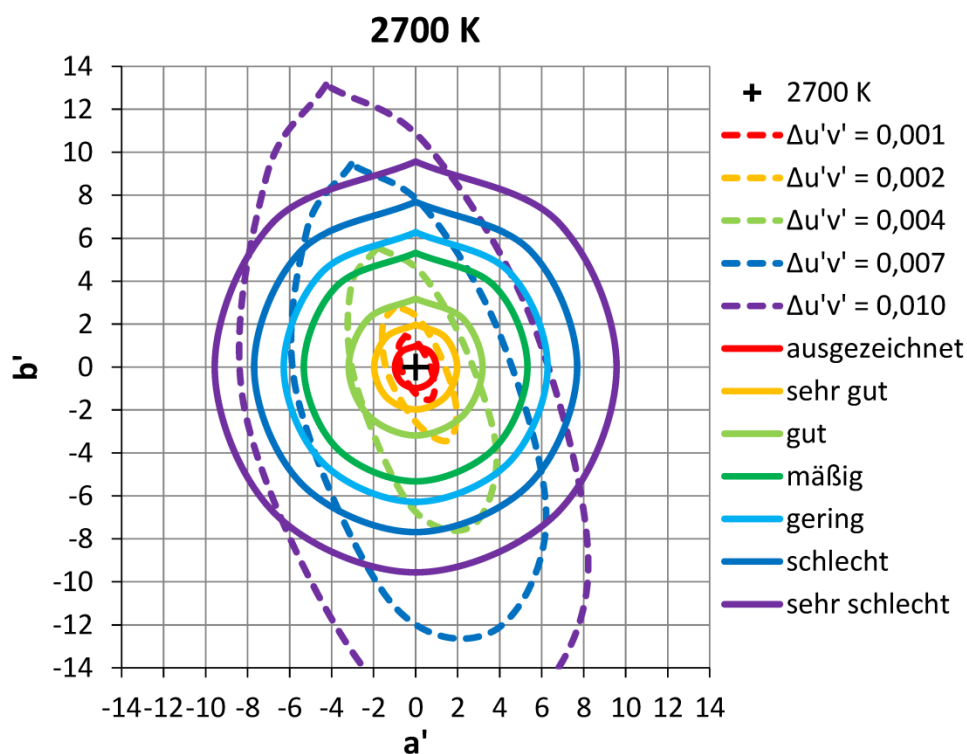


Abbildung A.37: Vergleich für das Farbzentrum 2700 K in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene

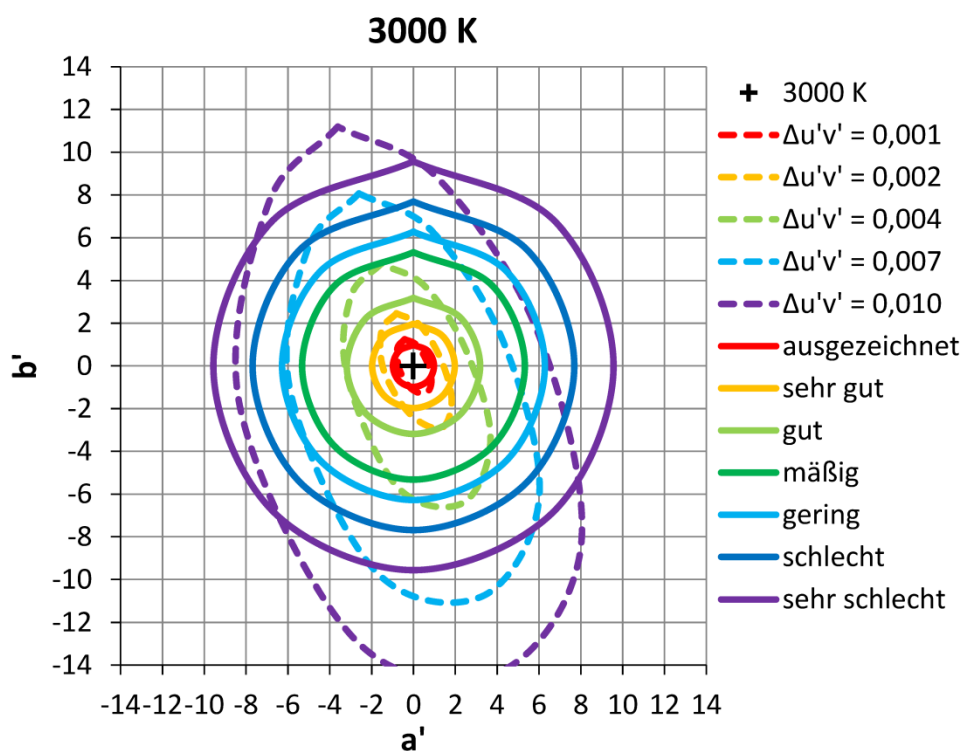


Abbildung A.38: Vergleich für das Farbzentrum 3000 K in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene

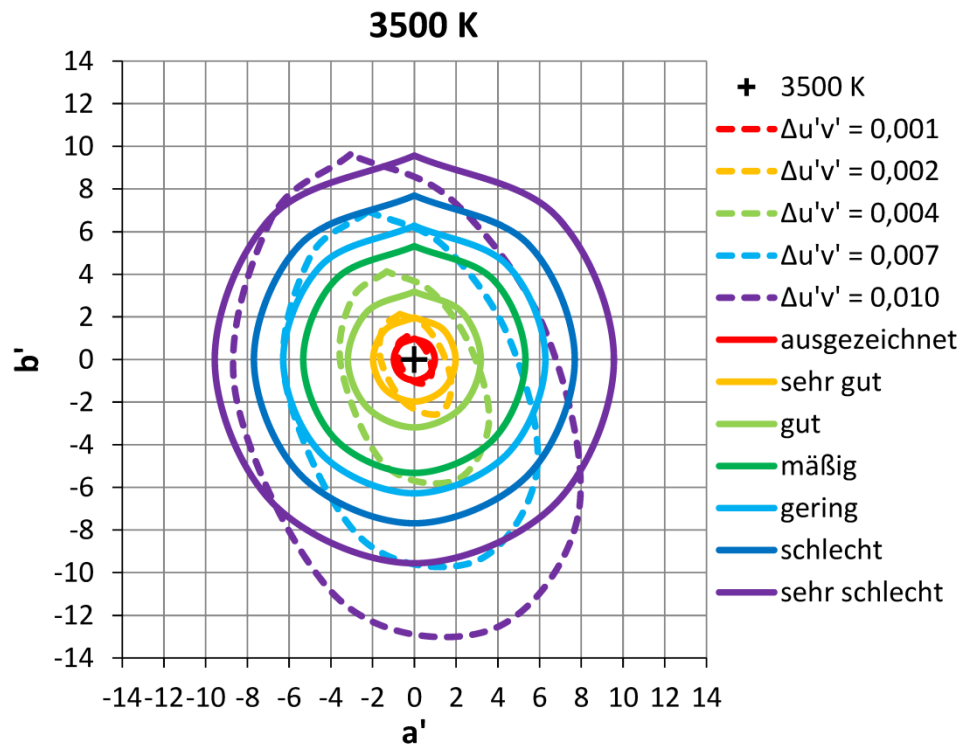


Abbildung A.39: Vergleich für das Farbzentrum 3500 K in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene

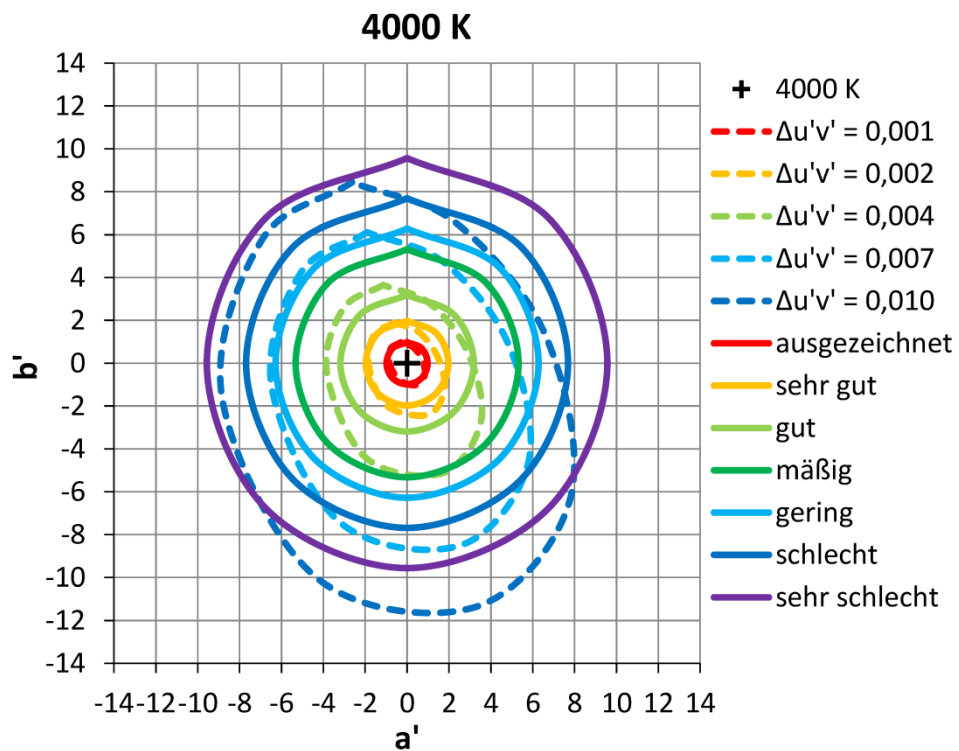


Abbildung A.40: Vergleich für das Farbzentrum 4000 K in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene

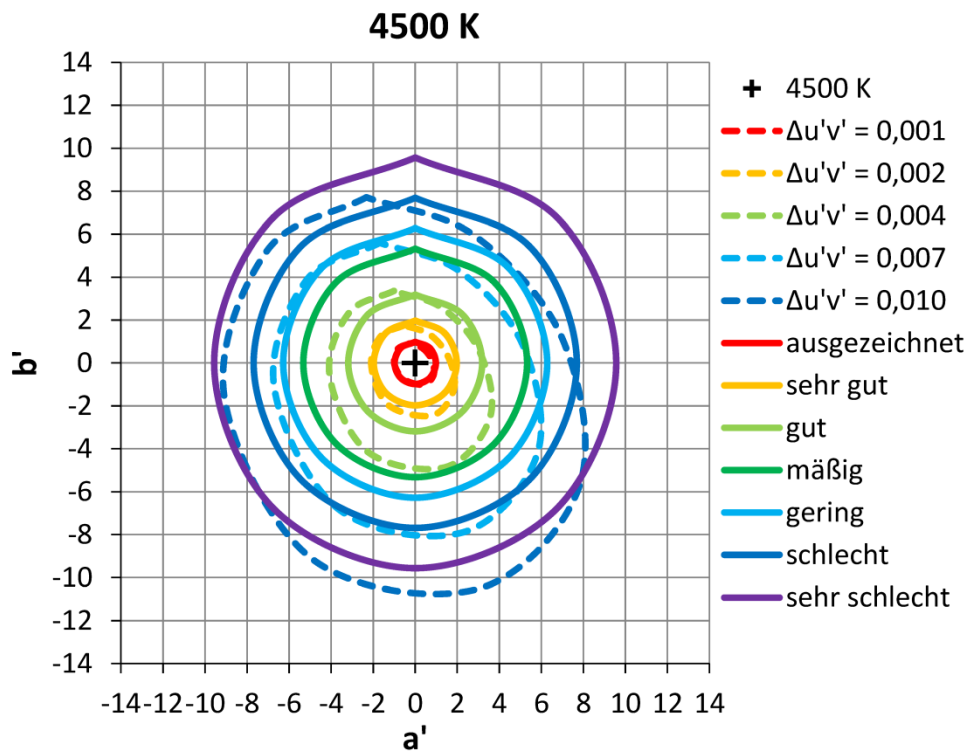


Abbildung A.41: Vergleich für das Farbzentrum 4500 K in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene

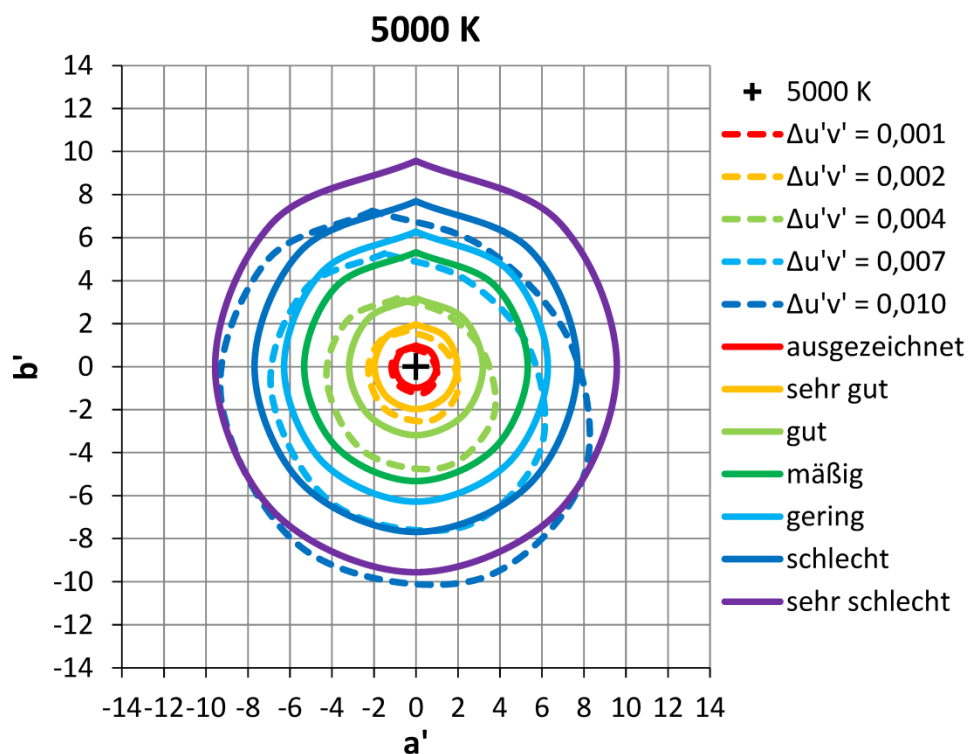


Abbildung A.42: Vergleich für das Farbzentrum 5000 K in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene

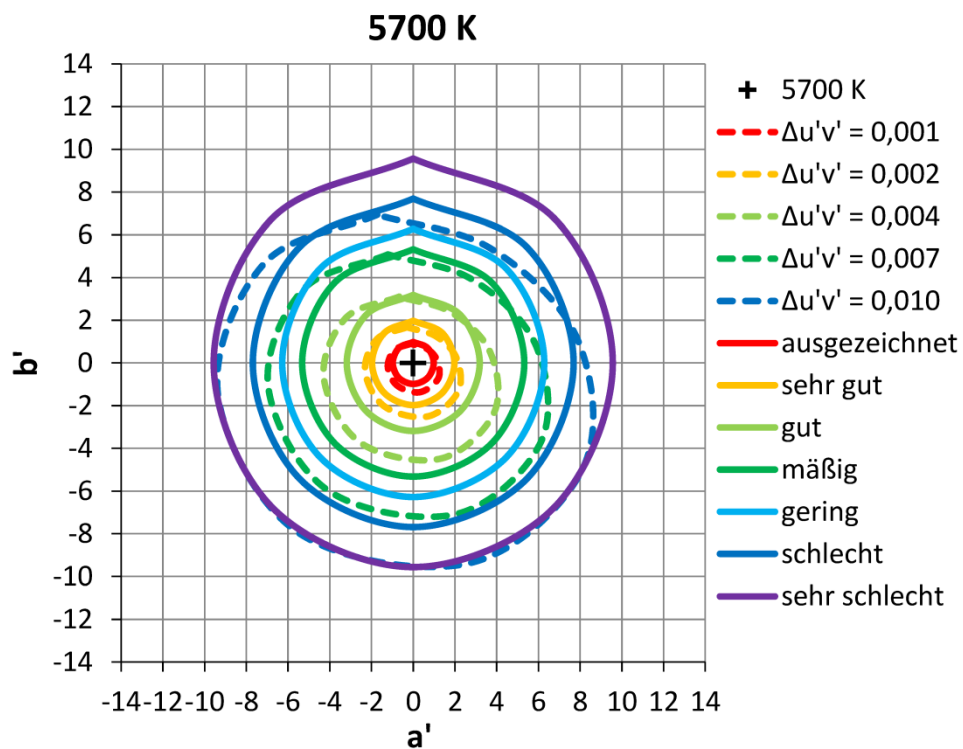


Abbildung A.43: Vergleich für das Farbzentrum 5700 K in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene

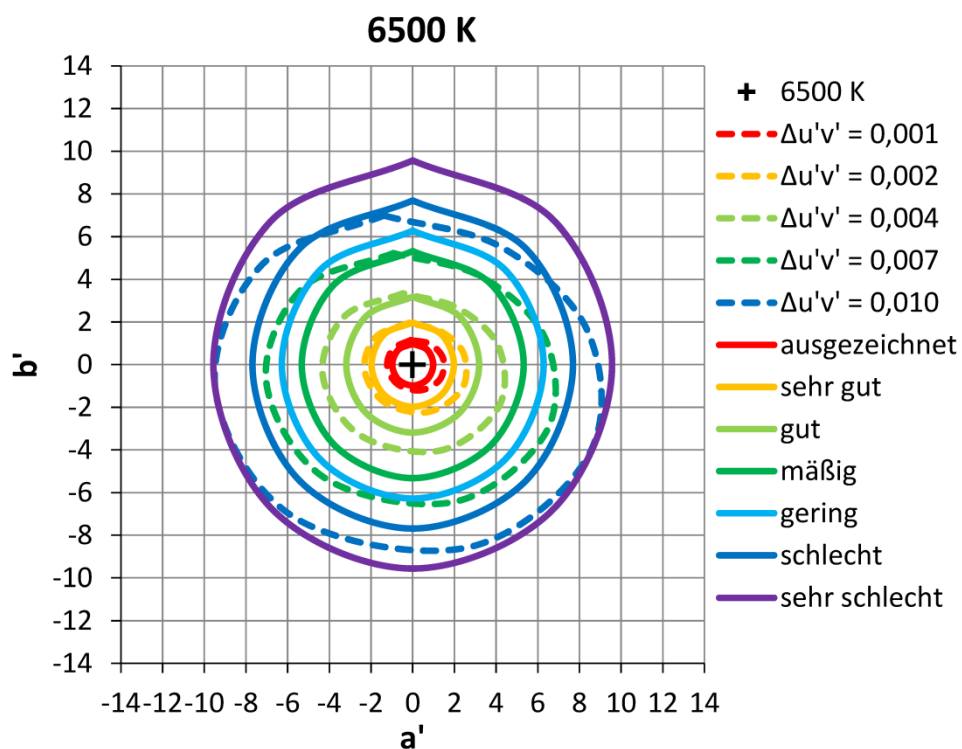


Abbildung A.44: Vergleich für das Farbzentrum 6500 K in der CIECAM02-UCS  $a'b'$ -Farbebene



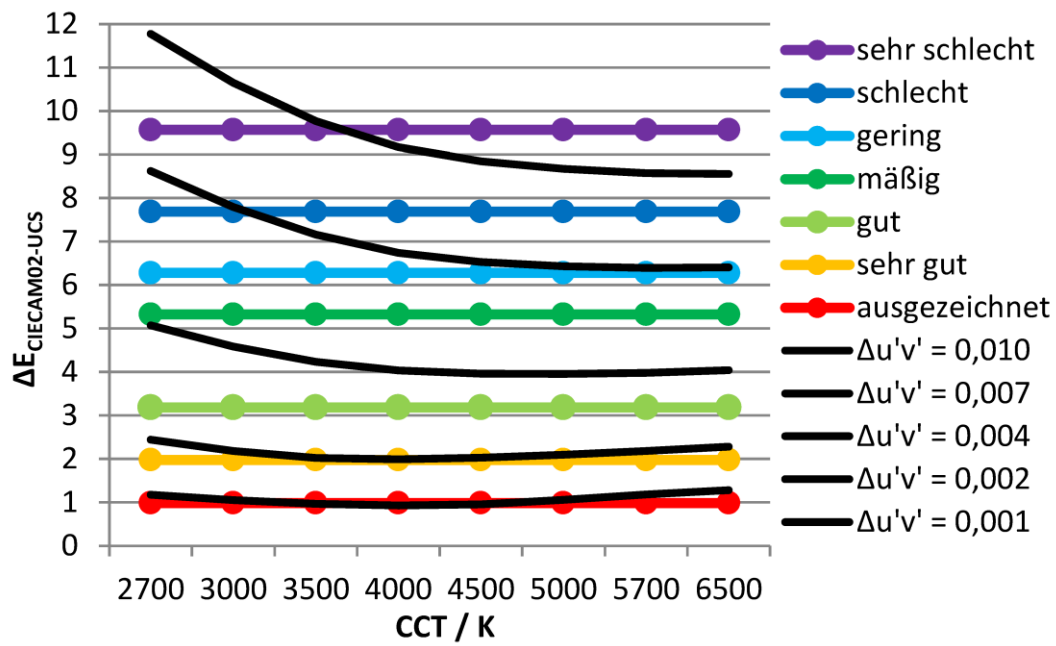


Abbildung A.45: Übersicht der Farbdifferenzen  $\Delta E$  (CIECAM02-UCS)

## Anhang B Dokumentation zu den Versuchsaufbauten

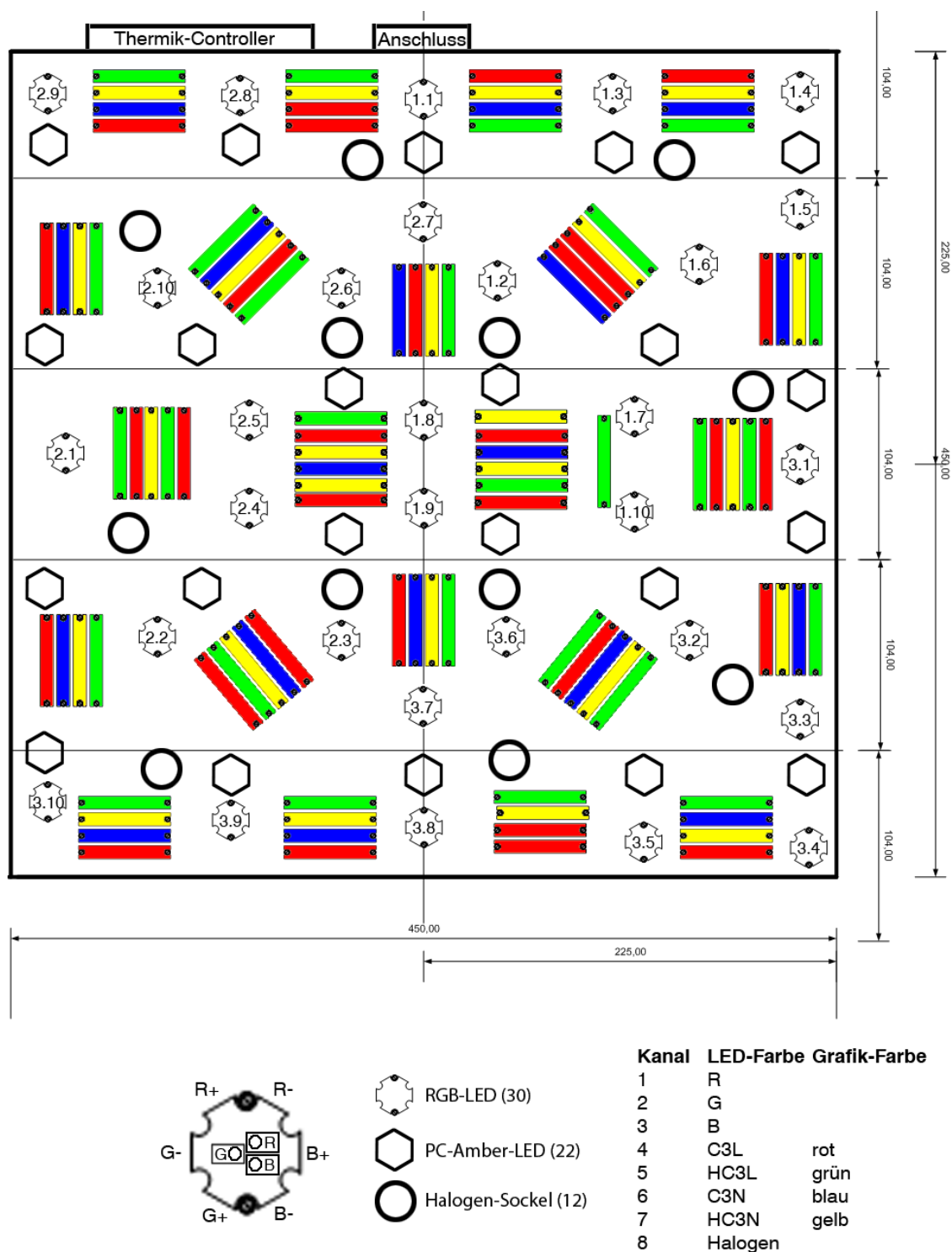


Abbildung B.1: Anordnung der LEDs auf dem LED-Board

Das LED-Board wurde sowohl für den Zweikammer-Box-Versuch als auch für den Tabletop-Versuch benutzt. Ziel des Aufbaues ist es, zusammen mit der im Strahlengang nachfolgenden Streuscheibe eine homogene Flächenlichtquelle mit einstellbarem Spektrum zur Verfügung zu stellen. Die Lichtquellen jeder Sorte sind daher möglichst gleichmäßig auf dem Kühlkörper-Board verteilt.

Tabelle B.1: Auf dem LED-Board installierte Lichtquellen

Kanal-nummer	Kurz-bezeichnung	Langbezeichnung	Anzahl Stränge	Anzahl Lichtquellen pro Strang	Anzahl gesamt
01	R	rote LEDs	3	10	30
02	G	grüne LEDs	3	10	30
03	B	blaue LEDs	3	10	30
04	C3L	weiße LEDs, warmweiß, low CRI	10	3	30
05	HC3L	weiße LEDs, warmweiß, high CRI	9	3	27
06	C3N	weiße LEDs, kaltweiß, low CRI	6	3	18
07	HC3N	weiße LEDs, kaltweiß, high CRI	8	3	24
08	HAL	Halogen-Glühlampen	1	8	8

Die Kühlung erfolgt passiv durch natürliche Konvektion. Die Kantenlänge des quadratischen Kühlkörpers (= LED-Boards) beträgt 45 cm. Die Anordnung der LEDs ist symmetrisch in vier annähernd gleiche Quadranten unterteilt. Ein Quadrant ist mit fünf Temperaturmesswiderständen ausgestattet (von innen nach außen, entlang der Linie RGB-LED 1.9 bis 3.4). Der steuernde Mikrocontroller bildet den Mittelwert der fünf Temperaturen und regelt mittels Heizwiderständen auf der LED-abgewandten Seite des Kühlkörper-Boards auf konstant 40 °C.

## Zweikammer-Box

Tabelle B.2: Liste der Versuchsdurchläufe für den Zweikammer-Box-Versuch

Versuchsdurchlauf	Testperson	# Versuch für diese Testperson
1	AG	1
2	HS	1
3	JI	1
4	NH	1
5	PB	1
6	RR	1
7	TK	1
8	WK	1

Übereinstimmung links und rechts bewerten

1

☐ 1 tadellos  
☐ 2 gut  
☐ 3 tolerierbar  
☒ 4 nicht annehmbar  
☐ 5 sehr schlecht

2

tadellos

tadellos

sehr schlecht

3

**Grauskala**  

8

Kein Unterschied

-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 +4 +5 +6

dunkler

heller

-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 +4 +5 +6

grüner

-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 +4 +5 +6

blauer

-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 +4 +5 +6

blasser

tadellos

sehr schlecht

Abbildung B.2: Fragebogen für den Zweikammer-Box-Versuch

## Ergänzende Versuche zu semantischen Kategorien

Farbige Objekte wie Blumen, Obst, Gemüse können unterschiedlich erscheinen, je nach beleuchtender Lichtquelle. Diese Eigenschaft von Lichtquellen nennt man Farbwiedergabe.

### Die Übereinstimmung zwischen Test- und Referenzlichtquelle ist...

100

gut

sehr schlecht

tolerierbar

nicht annehmbar

gering

sehr gut

tadellos

schlecht

mäßig

ausgezeichnet

0

Abbildung B.3: Fragebogen zur Kategoriebenennung (vor dem Ausfüllen)

Die Versuchsperson bringt zunächst die 10 angebotenen Begriffe auf der linken Seite in eine Reihenfolge. Im ausgefüllten Fragebogen ist die Zuordnung zu aufsteigenden Nummern erkennbar (gut = 4, sehr schlecht = 10 usw.). Im zweiten Schritt werden die Positionen der Begriffe auf der

Intervallskala festgelegt. Die Versuchspersonen markiert die entsprechende Position mit einem Kreuz oder Strich auf der Skala rechts.

Farbige Objekte wie Blumen, Obst, Gemüse können unterschiedlich erscheinen, je nach beleuchtender Lichtquelle. Diese Eigenschaft von Lichtquellen nennt man Farbwiedergabe.

## Die Übereinstimmung zwischen Test- und Referenzlichtquelle ist...



Abbildung B.4: Ausgefüllter Fragebogen zur Kategoriebenennung (blauer Stift = Versuchsperson, roter Stift = Auswertung)

Für die Auswertung werden manuell mit einem Lineal die Entfernungen zum Fußpunkt der Skala vermessen. Im Beispiel wurden für „gut“ 11,0 cm ermittelt. Die Gesamtlänge der Skala beträgt 15,0 cm. Abschließend werden die Entfernungen in Werte zwischen 0 und 100 umgerechnet.

## Tabletop

Tabelle B.3: Liste der Versuchsdurchläufe für den Tabletop-Versuch

Versuchsdurchlauf	Testperson	# Versuch für diese Testperson
1	NK	1
2	PB	1
3	IL	1
4	FG	1
5	JP	1
6	TK	1
7	AG	1
8	SP	1
9	DP	1
10	CB	1
11	BZ	1
12	AL	1
13	NM	1
14	SS	1
15	KK	1
16	MB	1
17	PU	1
18	SJ	1
19	PH	1
20	NK	2
21	SK	1
22	FR	1
23	NK	3
24	NM	2
25	FG	2
26	SB	1
27	SJ	2
28	FR	2





---

# Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

---

## Erklärung laut §9 PromO

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 17.04.2014

Stefan Brückner